

UNIVERSITE PAUL CEZANNE AIX-MARSEILLE III

**Reconstitution et Position Phylétique des Restes
Crâniens de l'Homme de Tautavel (Arago 21-47) et de
Biache-Saint-Vaast 2
Apports de l'Imagerie et de l'Analyse
Tridimensionnelles**

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE Paul CEZANNE
Faculté des Sciences et Techniques

Discipline : Paléontologie Humaine

présentée et soutenue publiquement par

Gaspard GUIPERT

Le 30 novembre 2005

Sous la direction du Professeur Daniel Nahon et du Docteur Bertrand Mafart

Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement

J U R Y

- M. Daniel NAHON, Professeur, CEREGE, Arbois	Directeur
- M. Bertrand MAFART, attaché au département de Préhistoire du M.N.H.N., Arbois	Co-Directeur
- M. Emiliano BRUNER, Professeur, Université La Sapienza, Rome	Rapporteur
- M. Jean SEQUEIRA, Professeur, Faculté de Luminy, Marseille	Rapporteur
- Mme Dominique GRIMAUD-HERVE, Professeur, M.N.H.N., Paris	Examineur
- Mme Marie-Antoinette de LUMLEY, Directeur de Recherche au CNRS, Paris	Examineur

ANNEE : 2005

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter d'abord toute ma gratitude à Monsieur le Professeur Henry de Lumley. Après m'avoir accueilli au sein du Laboratoire d'Anthropologie, de la Faculté Nord de Médecine de Marseille, pour le DEA Quaternaire : Géologie, Paléontologie Humaine, Odontologie, il m'a donné l'opportunité de réétudier les fragments crâniens d'Arago 21-47, les plus vieux restes humains découverts en France. Il m'a également permis de travailler sur les fragments originaux de Biache-Saint-Vaast 2 pour proposer une reconstitution de cet individu. En parallèle, j'ai eu le plaisir de fouiller à sa demande l'Unité Archéostratigraphique UA 25 du Lazaret. Pour tout cela, qu'il en soit remercié.

Ma reconnaissance va aussi à Madame Marie-Antoinette de Lumley qui m'a apporté son éclairage et ses idées concernant les reconstructions des crânes d'Arago 21-47 et de Biache-Saint-Vaast 2. Je la remercie d'avoir mis à ma disposition ses travaux préliminaires concernant Biache-Saint-Vaast 2 et d'avoir accepté de participer au jury de soutenance.

L'apprentissage universitaire est un chemin long, difficile, nécessitant des efforts sans relâche. Seuls les conseils, les critiques et les remarques permettent de progresser. Ceci est nécessaire et indispensable. Je remercie le Docteur Bertrand Mafart, attaché au Département de Préhistoire du MNHN, pour avoir partagé avec moi ses idées concernant les nouveaux développements de la Paléanthropologie. Je le remercie également pour m'avoir épaulé depuis mon DEA, pour m'avoir dirigé et guidé tout au long de cette thèse et m'avoir poussé à suivre le DESS Compétence Complémentaire en Informatique. S'il ne m'avait pas associé au projet FOVEA, je n'aurais sûrement pas pu réaliser cette thèse dans de bonnes conditions matérielles et scientifiques.

Je n'ai pas de mot assez fort pour remercier Monsieur le Professeur Daniel Nahon qui nous a accueillis au CEREGE, Elise et moi, après la période complexe que nous avons traversée en 2004 et qui a accepté de nous co-diriger. Il m'a permis ainsi d'achever ce travail. J'espère avoir répondu à ses attentes ainsi qu'à celles de Monsieur le Professeur Bruno Hamelin, Directeur de l'Ecole Doctorale Sciences de l'Environnement.

Ma reconnaissance va aussi à Monsieur le Professeur Jean Sequeira, qui a accepté ma candidature pour le DESS Compétence Complémentaire en Informatique à la Faculté des

Sciences de Luminy, ainsi qu'aux enseignants qui m'ont permis d'apprendre et de mieux comprendre ces notions absconses de float, vertices, modélisation tridimensionnelle, sans lesquelles ce travail n'aurait pu être réalisé. Merci à lui d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail.

Je suis touché par l'honneur que me fait le Professeur Emiliano Bruner en participant à l'évaluation de cette thèse en tant que rapporteur et examinateur.

Je tiens à remercier le Professeur Dominique Grimaud-Hervé, en plus des conseils qu'elle a pu me donner au cours de nos différentes rencontres, d'avoir accepté de prendre place dans mon jury de thèse.

Je dois beaucoup à l'équipe de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse et à Monsieur le Professeur Jean-Pierre Jessel pour l'accueil et l'aide qui m'ont été offerts dans le cadre du stage de DESS et du projet FOVEA.

Je remercie Monsieur Hervé Delingette pour m'avoir permis d'utiliser l'interface Yav++ sans laquelle je n'aurais pu débiter mes travaux et expérimenter la modélisation virtuelle.

Monsieur Gérard Subsol m'a apporté une aide non négligeable dans l'élaboration de fichiers Pearl, langage informatique qu'il m'a fait découvrir.

J'adresse un grand merci aux services de Monsieur le Professeur Agostini, Hôpital Sainte-Marguerite, Marseille, ainsi qu'à ceux de Monsieur le Professeur Cabanis, C.H.N.O. des Quinze-Vingts, Paris, pour la réalisation des scanners à rayonnement X des fossiles étudiés, supports nécessaires pour les modélisations tridimensionnelles et les comparaisons virtuelles.

Merci à Monsieur Patrick Corbex, de la Société Initiale, qui m'a aidé à maîtriser des logiciels lourds et complexes et qui m'a apporté son expérience et son savoir faire technique au cours des étapes préliminaires de la reconstruction du crâne Arago 21-47.

Je tiens à saluer les équipes de chercheurs et d'étudiants des sites préhistoriques de Tautavel et du Lazaret pour leur accueil durant mes différents déplacements et campagnes de fouilles.

Une pensée pour Elise Jeusel, pour les nombreuses discussions scientifiques, pour les échanges de points de vue concernant l'évolution humaine, la méthodologie et les notions Procustes, et pour sa bonne humeur.

J'ai aussi une pensée pour l'équipe d'enseignants, chercheurs et étudiants de l'ancien Laboratoire d'Anthropologie parmi lesquels je citerai Messieurs Gérard Onoratini et Lucien Jourdan. Je n'oublie pas Messieurs Tronchetti et Babinot sans qui je ne me serais pas autant intéressé à la Paléontologie et à l'Evolution Humaine en particulier.

Merci aux camarades de Faculté et aux amis pour les pauses rigolades au milieu de ce travail complexe : Mathieu, Karine, Francis, Isabelle, Stéphane, Stéphanie, Sophie, Adrian, Frédéric, Amélie, Mireille.

Un grand merci à ma famille et à ma belle-famille pour leur écoute et leur aide durant les différentes étapes de ce travail.

Pour terminer, que seraient des remerciements sans une évocation de l'être aimé, qui vous accompagne et vous soutient, qui vous donne son opinion, ses idées et corrige vos fautes...

Merci à toi Valérie pour tout ce que tu m'as apporté et j'espère te le rendre dans l'avenir en tant qu'époux.

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	7
INTRODUCTION.....	9
CHAP. I : ETAT DES CONNAISSANCES ANATOMIQUES, MORPHOMETRIQUES ET INFORMATIQUES.....	13
CHAP. II : MATERIELS PALEOANTHROPOLOGIQUES	35
CHAP. III : METHODES TRIDIMENSIONNELLES	61
CHAP. IV : NOUVELLE RECONSTRUCTION DU CRANE ARAGO 21-47 A PARTIR DE L'IMAGERIE TRIDIMENSIONNELLE : LA CHIMERE ARAGO3D.....	101
CHAP. V : ETUDE PALEOANTHROPOLOGIQUE ET RECONSTRUCTION VIRTUELLE DU CRANE DE BIACHE-SAINT-VAAST 2.....	141
CHAP. VI. : RECONSTRUCTION VIRTUELLE COMPLEMENTAIRE : DMANISSI D2282*	193
CHAP. VII : RESULTATS DES SUPERIMPOSITIONS PROCUSTES.....	205
CHAP. VIII : DISCUSSION	333
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	373
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	377
TABLE DES MATIERES	407
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	411
ANNEXES	421
PUBLICATIONS	439

INTRODUCTION

Position Phylétique et Taxonomie des Hominidés – Problématique

La détermination phylétique des restes d'Hominidés est un sujet complexe en raison de l'étendue des zones d'occupation potentielle et de séquences chronologiques se chevauchant. Ces fossiles font l'objet de théories phylétiques multiples. De par l'état fragmentaire de nombreux fossiles, certaines espèces ne sont définies que par quelques ossements. Il en découle une difficulté d'attribution de nouveaux restes à une espèce, voire, à un genre.

La découverte en 1971 du massif facial déformé d'Arago 21 est concomitant de la remise en cause et de l'abandon de la théorie des Présapiens européens de Vallois (BOULE *et al.*, 1952) selon laquelle l'*Homo sapiens* dérivait d'un ancêtre européen indépendant de celui des Néandertaliens, les Prénéandertaliens. A la suite de cela, il existait un consensus européen autour d'un modèle phylétique simple : les *Homo erectus* d'Europe du Pléistocène moyen avaient précédé chronologiquement les Néandertaliens. Ces fossiles étaient aussi regroupés sous l'appellation Prénéandertaliens de Vallois ou sous l'appellation plus chronologique créée par H. et M.-A. de Lumley d'Anténéandertaliens (1971) dont l'Homme de Tautavel était l'un des plus anciens et plus complets représentant.

Les découvertes récentes d'Hominidés fossiles en Europe dont certains datent de plus de 1,8 millions d'années (Ceprano, ASCENZI *et al.*, 1996 ; Gran Dolina, ARSUAGA, 1999 ; Dmanissi, GABUNIA *et al.*, 2000) ont entraîné la création de nouvelles espèces (elles-mêmes discutées ; CAMERON *et al.*, 2004), nécessitant de nouveaux modèles phylétiques et chronologiques d'occupation de l'Europe (RIGHTMIRE, 1998 ; MANZI *et al.*, 2001 ; GABUNIA *et al.*, 2002 ; MALLEGNI *et al.*, 2003 ; GILBERT *et al.*, 2003 ; CAMERON *et al.*, 2004 ; BRUNER *et al.*, 2005).

Ainsi, Rightmire (1998), a regroupé les *Homo erectus* d'Europe et d'Afrique du Pléistocène moyen sous l'appellation *Homo heidelbergensis*, regroupant dans cette espèce polymorphe l'ancêtre des Néandertaliens et des Hommes modernes.

Certains modèles, comme celui de Manzi (2004), complexifiaient les relations entre les différents Hominidés du Pléistocène moyen en évoquant des mouvements de population multiples vers l'Europe. Ces modèles renforçaient le caractère chronologique de la notion d'Anténéandertalien.

D'autres comme Vialet (2005) distinguaient de nouveau les *Homo heidelbergensis* d'Europe et les *Homo rhodesiensis* d'Afrique, précisait que les Hominidés européens d'Europe ne semblaient pas tous orientés vers la néandertalisation.

Quelle est donc la place de l'Homme de Tautavel (Arago 21-47, un des individus fragmentaires découverts dans la Caune de l'Arago) au sein de tous ces modèles phylétiques ? Ces modèles ne précisent pas ou peu la transition entre les derniers Anténéandertaliens et les Néandertaliens. Quelles sont les relations entre ces individus ?

Les fragments crâniens Arago 21-47 associent un massif facial déformé post mortem ainsi que des os de la voûte bipariétale. Afin de pouvoir réaliser l'étude de ce fossile et de proposer un positionnement phylétique, il est nécessaire de restaurer le massif facial et la calotte crânienne.

Différentes reconstitutions ont été réalisées au cours des années 1980 en utilisant des fragments allochtones (os occipital, temporaux) prélevés sur des moulages d'autres crânes fossiles. Ces reconstitutions, appelées chimères pour souligner cette association d'éléments de fossiles différents, sont-elles toujours acceptables au regard des dernières découvertes ? Une nouvelle étude comparative, anatomique et morphométrique, incluant les nouveaux fossiles découverts, s'avérerait nécessaire afin de mieux connaître la conformation crânienne des *Homo heidelbergensis* anciens, dont Arago 21-47.

Les buts de cette nouvelle étude étaient d'affiner la reconstitution du crâne Arago 21-47 et de proposer une nouvelle chimère de celui-ci.

La réalisation d'une nouvelle reconstitution, si elle différait des précédentes, devait permettre de proposer de nouvelles positions phylétiques de ce fossile par rapport aux nouvelles espèces (*Homo georgicus*, *Homo antecessor*, *Homo cepranensis*), aux Anténéandertaliens (LUMLEY *et al.*, 1985) et aux autres membres polymorphes des *Homo heidelbergensis* (RIGHTMIRE, 1998).

La connaissance de la morphologie des derniers *Homo heidelbergensis* d'Europe et la transition de ceux-ci avec les Néandertaliens sont aussi limitées en raison d'individus fragmentaires (La Chaise Abri Suard, Biache-Saint-Vaast 1). L'examen des restes inédits et fragmentaires du spécimen Biache-Saint-Vaast 2, ainsi que la réalisation d'une chimère du crâne de cet individu, selon la même méthode, était une étape nécessaire pour permettre de situer phylétiquement ce fossile inédit et améliorer la compréhension des relations phylétiques.

entre les populations fossiles du Pléistocène moyen récent et les Hominidés du Pléistocène supérieur en Europe.

Ces nouvelles approches de ces fossiles ont été rendues possibles par les progrès synchrones en imagerie médicale, en modélisation virtuelle et en analyses statistiques tridimensionnelles avec l'essor de la morphométrie 3D.

La mise à notre disposition de scanners par rayonnement X de fossiles comme Ceprano 1, Sima de los Huesos 5, Dmanissi D2282, ainsi que l'analyse des fragments originaux Arago 21-47 et Biache-Saint-Vaast 2, ont permis une nouvelle étude, virtuelle, de ces deux individus.

Après avoir présenté les différents spécimens fossiles ainsi que les techniques tridimensionnelles utilisées, nous réétudierons les anciennes reconstitutions du crâne Arago 21-47 avant de proposer notre chimère numérique, après compensation des déformations. Nous décrirons ensuite les restes inédits de Biache-Saint-Vaast 2 et présenterons une reconstruction virtuelle de ce fossile en utilisant des fragments allochtones.

Nous inclurons ensuite ces deux fossiles dans une série de comparaisons Procustes et d'Analyses en Composantes Principales. Ceci nous permettra de préciser la conformation tridimensionnelle de nos chimères par rapport aux autres Hominidés fossiles et de proposer un nouvel arbre phylétique concernant les espèces du genre *Homo*.

Chap. I : Etat des Connaissances Anatomiques, Morphométriques et Informatiques

Avant d'évoquer les fossiles utilisés dans notre étude ainsi que les méthodologies sélectionnées, nous présentons les différentes espèces du genre *Homo* et leur anatomie, ainsi que l'évolution de la technologie tridimensionnelle.

I.1 Morphologie crânienne des différentes espèces considérées dans le genre *Homo*

Nous ne présentons pas une liste exhaustive de caractères anatomiques caractérisant chaque espèce, mais une série de caractères sur lesquels nous reviendrons au cours de l'étude.

I.1.1 *Homo habilis* Leakey *et al.*, 1964 / *Homo rudolfensis* Alexeev, 1986

L'espèce *Homo habilis* n'a pas été définie à partir d'un reste fossile complet, mais seulement à partir de restes fragmentaires. Ceci est une des sources de discussion concernant l'attribution des fossiles entre les deux espèces, tout comme la grande variabilité des spécimens découverts (WOOD *et al.*, 2000). Nous utilisons l'expression de « premiers *Homo* » (PRAT *et al.*, 2001) ou « early *Homo* » afin de grouper les deux espèces. Certains auteurs (WOOD *et al.*, 1999a, 1999b, 2000) sont partisans de reclasser phylétiquement ces deux espèces dans le genre *Australopithecus*.

Les deux espèces présentent un volume cérébral égal ou supérieur à celui des Australopithèques avec une supériorité des *Homo rudolfensis* sur les *Homo habilis*. Le prognathisme maxillaire (supérieur chez *Homo rudolfensis*) tout comme la constriction post-orbitaire sont moindres par rapport aux Australopithèques. L'écaille frontale est convexe sagittalement. Les lignes temporales sont plus hautes sur le pariétal chez les *Homo habilis* que chez les *Homo rudolfensis*. La courbure de l'os pariétal est intermédiaire entre celle des Australopithèques et celles des *Homo* plus récents. La face, au niveau de la largeur bijugale, est plus large chez les *Homo rudolfensis*. Le torus supra-orbitaire de ceux-ci est plus petit que celui des *Homo habilis*. Les contours des cavités orbitaires des *Homo rudolfensis* sont carrés avec des bords supérieurs et inférieurs au même niveau en projection horizontale (bord supérieur avancé chez *Homo habilis*).

I.1.2 *Homo ergaster* Groves et Mazák, 1975

Cette espèce africaine possède un crâne long et bas, avec une capacité crânienne accrue par rapport aux premiers *Homo* ($700 < < 1250 \text{ cm}^3$). La largeur maximale du crâne est située à la partie inférieure de l'os temporal. La largeur maximale de la voûte bipariétale est basse. Les spécimens présentent une carène sagittale bordée de dépressions ou méplats parasagittaux. L'os frontal est bas et peu convexe. Le torus sus-orbitaire est développé, épais, et souvent séparé de l'écaille par un sillon supra-toral (ZEITOUN, 2000). La constriction post-orbitaire est encore prononcée. Une éminence bregmatique assure la transition entre l'écaille cérébrale frontale et la voûte bipariétale. Les os pariétaux sont aplatis et rectangulaires avec des parois latérales convergeant vers le haut. Les lignes temporales sont marquées et se prolongent par un torus angularis.

I.1.3 *Homo erectus Pithecanthropus* Dubois, 1894 – *Sinanthropus* Black, 1927

Les *Homo erectus* présentent une voûte crânienne basse et étirée avec des largeurs bipariétale et maximale distinctes, toutes les deux basses et postérieures. La vue supérieure permet d'observer un neurocrâne de forme sphénoïde du fait des largeurs postérieures et d'une forte constriction post-orbitaire (GRIMAUD-HERVE, 2000). Le neurocrâne présente une carène sagittale autour d'une éminence bregmatique. Le torus angularis est moins marqué. La transition entre le plan nuchal et l'écaille occipitale a un aspect anguleux. La face de ces individus est mal connue en raison d'une mauvaise conservation de celles-ci chez la majorité des spécimens en dessous du torus sus-orbitaire.

I.1.4 *Homo georgicus* Gabunia *et al.*, 2002

Homo georgicus est représenté par une série de mandibules et par quatre crânes plus ou moins déformés et complets et des restes post-crâniens. Après la découverte de mandibules, deux crânes avec un faible volume cérébral, inférieur à 800 cm^3 ont été découverts en 1999 (GABUNIA *et al.*, 2000, 2001). D2280 est une calvaria allongée et aplatie tandis que D2282 est un crâne plus complet mais présentant plus de déformations. Le troisième spécimen, D2700, est plus complet, plus court, avec une face plate et un prognathisme maxillaire, un aspect de la calotte crânienne en ogive en vue postérieure, un front aplati et étiré (VEKUA *et al.*, 2002). Le crâne D2700 est moins prognathe au niveau maxillaire que D2282 (VEKUA *et al.*, 2002). L'espèce a été définie à partir de l'étude de mandibules découvertes en 1991 (D211) et en 2000 (D2600) (GABUNIA *et al.*, 2002).

I.1.5 Les Anténéandertaliens

Trois espèces se sont succédées en Europe en moins d'un million d'années. Les deux plus anciennes ne sont connues que par un faible nombre de restes et ont été découvertes après la création de l'appellation Anténéandertaliens (LUMLEY *et al.*, 1985). Ce terme regroupait les spécimens découverts en Europe (Atlantique à la Transcaucasie) entre la période -1,5 Ma et l'apparition des Néandertaliens (-0,08 Ma). Cette définition est géographique et chronologique, et ne tient pas compte de la position phylétique des individus. Nous discuterons plus loin de la possibilité d'élargir cette définition aux *Homo georgicus* ou de la préciser phylétiquement.

Une autre expression est aussi utilisée pour évoquer les précurseurs des Néandertaliens : les Prénéandertaliens (BOULE *et al.*, 1952 ; HUBLIN, 1980 ; ROUGIER, 2003). Ce terme est plus phylétique que celui d'Anténéandertaliens. Il correspond aux Hominidés engagés sur la voie de la néandertalisation.

L'espèce *Homo cepranensis* Mallegni *et al.*, 2003, a été découverte en Italie en 1994. Les auteurs voient en cette espèce la première à avoir quitté l'Afrique (Bouri serait l'un de ses représentants africain) pour établir des peuplements en Europe il y a un million d'années (MALLEGNI *et al.*, 2003). Cette espèce serait aussi selon eux l'ancêtre d'*Homo rhodesiensis*.

Le site d'Atapuerca, Gran Dolina, en Espagne a fourni les seuls restes attribués à l'espèce *Homo antecessor* Bermudez de Castro *et al.* 1997 et qui présenteraient des caractères communs aux Néandertaliens et Hommes modernes (ROSAS *et al.*, 2002). Cette espèce aurait été contemporaine (-800 000 ans ; PARES *et al.*, 1995, 1999) d'*Homo cepranensis*. Nous n'avons étudié aucun reste crânien d'individus appartenant à cette espèce.

Homo heidelbergensis Schoetensack, 1908

Cette espèce précède chronologiquement les Néandertaliens. La limite entre les deux espèces est difficile à établir en raison de la présence ou l'absence d'apomorphies et/ou de plésiomorphies selon les spécimens.

Le crâne est allongé, avec un maxillaire plus postérieur. La largeur maximale du crâne est basse chez les spécimens les plus anciens. Un torus angularis est présent chez certains individus (Arago, Petralona). Le rétrécissement post-orbitaire est moins important pour les spécimens récents. Les arêtes et lignes temporales sont moins marquées pour les individus récents et une dépression pré-lambdatique apparaît (Biache-Saint-Vaast 1).

Homo rhodesiensis Woodward, 1921

Cette espèce pose quelques difficultés de classement phylétique, certains auteurs (WOOD *et al.*, 1999a, 1999b ; MANZI *et al.*, 2001b ; VIALET, 2005) classant dans cette espèce les fossiles africains contemporains des *Homo heidelbergensis*, d'autres considérant l'ensemble des fossiles européens et africains en une seule espèce *Homo heidelbergensis* (CAMERON *et al.*, 2004a).

I.1.6 *Homo neanderthalensis* King, 1864

Les Néandertaliens ont un torus supra-orbitaire développé, surmontant des cavités orbitaires courbées contrairement à celles à tendance rectangulaires et obliques des *Homo sapiens*. Le torus sus-orbitaire est de type III suivant la classification de Cunningham (1908). Le crâne, fortement pneumatisé au niveau de la face, de l'os frontal et de l'occipital, est allongé. Il présente un chignon occipital, correspondant en vue sagittale à une dépression pré-lambdatique séparant la voûte bipariétale de l'os occipital. Ce caractère n'est pas exclusif aux Néandertaliens, certains *Homo sapiens* archaïques ou actuels en présentant un (TRINKAUS *et al.*, 1982). Le massif facial des Néandertaliens se projette antérieurement dans le plan sagittal au niveau des arcades. En vue postérieure et en section frontale, le contour crânien est curviligne, avec une voûte bipariétale courbée continuellement.

La position phylétique des Néandertaliens (leur appartenance à l'espèce *Homo sapiens*) est discutée depuis sa découverte.

I.1.7 *Homo sapiens* Linnaeus, 1758

Notre espèce présente un crâne curviligne, préférentiellement court antéro-postérieurement (brachycéphale). Le prognathisme maxillaire est faible à inexistant (face verticale). La constriction post-orbitaire est très faible. La voûte crânienne est haute. La face est réduite. Le rapport entre la face et le neurocrâne a diminué par rapport aux espèces précédentes (HEIM *et al.*, 2000). Les cavités orbitaires sont rectangulaires et obliques latéralement. Suivant la classification de Cunningham (1908), les structures sus-orbitaires sont toutes dissociées (type I). Le crâne en section frontale présente un contour pentagonal.

I.2 Acquisition des Connaissances morphométriques

I.2.1 Supports d'acquisition des données

I.2.1.1 Rayons X

Les techniques radiologiques ont été utilisées en paléanthropologie et anatomie comparée dès leur découverte. Dès 1906, une dizaine d'années seulement après la découverte des rayons X par W. C. Röntgen, les données radiographiques étaient intégrées à l'étude de restes humains néandertaliens découverts en Croatie à Krapina (GORGANOVIC-KRAMBERGER, 1906).

I.2.1.2 Scanners

A partir des années 1980, la mise au point et le développement technique constant des scanners médicaux a rapidement conduit à des applications paléontologiques. En 1982, Tate et Cann ont montré dans une étude comparative l'intérêt de l'utilisation de cette nouvelle technologie dans le cadre de l'analyse des ossements fossiles (TATE *et al.*, 1982). Par une méthode non invasive, il est possible d'étudier la structure interne de l'os, apportant des informations sur la morphologie fonctionnelle, ceci dans différentes directions, au moyen d'images virtuelles, orientables dans toutes les directions. Cet article a montré l'importance de cette technologie dans le domaine de la PaléoAnthropologie. Depuis, les auteurs ne cessent de recommander cette méthode (CONROY *et al.*, 1985 ; ZONNEVELD *et al.*, 1985 ; FOX *et al.*, 1995 ; FAJARDO *et al.*, 2002 ; L'ENGLE WILLIAMS *et al.*, 2003 ; QIU *et al.*, 2003).

La qualité d'analyse dépend grandement de la qualité de seuillage des images numériques, problème rencontré dans d'autres champs d'application des scanners (FAJARDO *et al.*, 2002). Les différentes parties des ossements n'ont pas la même densité. De même, dans le cadre d'ossements fossiles, une couche minérale peut être présente et nécessiter un travail de seuillage. Certaines fois les minéraux sont trop incrusté et la différenciation s'avère impossible (ZONNEVELD, 2002 ; BRUNER *et al.*, 2003b).

I.2.1.3 Appareils d'acquisition de données tridimensionnelles (digitaliseurs)

Les Paléoanthropologues utilisent de plus en plus des outils d'enregistrement de coordonnées spatiales, basés sur des pointeurs numériques. Les données sont ensuite stockées sous différents supports informatiques de base de données (Excel, Access, fichiers txt) ou

d'autres logiciels développés spécifiquement comme le Flaspont® 3-D Digitizer (Z'GRAGGEN, 2001), le Polhemus® 3Space digitizer (L'ENGLE WILLIAMS *et al.*, 2003) ou le Microscribe®3DX (DETROIT, 2000 ; DELSON *et al.*, 2001 ; HARVATI, 2003a). D'autres systèmes sont utilisés tels les scanners lasers (FRIESS *et al.*, 2002 ; GÜGEL *et al.*, 2002), ou les systèmes d'acquisition par caméra numérique enregistrant les ombres sur les volumes suite à la projection de raies de lumière (KULLMER *et al.*, 2002).

Bien que portables et extrêmement précis (entre 0,25 et 0,5 mm pour le laser ; FRIESS *et al.*, 2002 ; et 50 µm pour HOTPAD ; KULLMER *et al.*, 2002), ces systèmes ont pour défaut de ne pas pouvoir accéder aux structures internes du fossile non fracturé

D'autres supports d'acquisition des données, présentant une grande finesse de résolution, sont en cours d'adaptation en vue d'études futures : l'IRM (STEIGER, 2001 ; WEBER, 2001 ; JEFFERY, 2002 ; JEFFERY *et al.*, 2004) et les microscanners (FAJARDO *et al.*, 2001 ; FAJARDO *et al.*, 2002). Cependant, en raison d'une faible taille de la chambre de mesure, les microscanners sont pour l'instant limités à de petits fossiles ou à des dents.

I.2.2 Obtention des données pour l'étude des fossiles

I.2.2.1 Premières radiographies, étude des structures endocrâniennes

Malgré les technologies tridimensionnelles, les radiographies à rayonnement X sont toujours utilisées pour des études anatomiques. En 2003, Baaten *et al.* ont réalisé une estimation du taux de sutures métopiques complètes dans la population libanaise en se basant sur des clichés radiographiques ante-mortem. Les résultats comparés à ceux d'autres populations, mettrait en évidence que ce moyen minore le chiffre réel (0,82% contre un minimum de 2%). La radiographie n'est qu'un outil diagnostique et non exploratoire pour l'étude des fossiles. L'étude au moyen de radiographies de fossiles nécessite d'imprégner les os par une solution acide pour dissoudre les agrégats minéraux, ce qui entraîne une fragilité supérieure des crânes (WIND *et al.*, 1988).

I.2.2.2 Scanners Computed tomography

Des travaux de présentation de l'intérêt de ce support ont été réalisés (CONROY *et al.*, 1985 ; ZONNEVELD *et al.*, 1985). Avec la troisième génération de scanners médicaux, la qualité des coupes scanners est devenue supérieure à celle des radiographies par rayonnement X (WIND *et al.*, 1988). Avec le développement du support informatique certains chercheurs ont ensuite travaillé sur des reconstructions tridimensionnelles virtuelles.

En 1995, Fox *et al.* ont estimé que la qualité des coupes CT ainsi que celle des reconstitutions virtuelles permettait de diagnostiquer correctement des pathologies intra-crâniennes sans recourir aux techniques habituelles (radiographie). En 1997, Kragsskov *et al.* ont comparé la fiabilité des points de repères sur des radiographies céphalométriques et celle de points pris sur des reconstitutions tridimensionnelles réalisées à partir de scanners. La variation inter-observateur était supérieure dans le cadre des scanners à celle des méthodes traditionnelles. Une des conclusions de ce travail était que l'utilisation des reconstitutions virtuelles n'était pas encore assez fiable dans ce cadre précis. La reconnaissance de structures s'avérait correcte visuellement mais restait inférieure en précision pour réaliser des mesures précises. Nous précisons que les coupes scanners mesuraient 2 mm alors que désormais les chercheurs essaient d'avoir des valeurs inférieures au millimètre, voir au dixième de millimètre (FAJARDO *et al.*, 2002). Ceci est une notion importante de la modélisation virtuelle : plus les coupes sont fines plus elles sont nombreuses, alors plus la reconstitution a un rendu proche de la réalité (KIM *et al.*, 2002 ; QIU *et al.*, 2003). Plus la résolution est puissante, plus les données obtenues sont fiables (FAJARDO *et al.*, 2002). En 2003, L'Engle Williams *et al.* ont obtenu sur des reconstitutions issues de CT des mesures similaires à celles que l'on pouvait obtenir directement par digitaliseur.

Une nouvelle forme d'hélice CT, l'hélice multi-coupe ou Multislice-CT (MSCT) a fait son apparition depuis 1999 (RÜHLI *et al.*, 2002) et semble plus précise que les autres systèmes. Cependant, des artefacts empêchant de bien décrire les structures et d'exploiter les coupes CT sont possibles (MANZI *et al.*, 2001a ; ZONNEVELD, 2002).

Un premier colloque international a été organisé dans le cadre du XIV^{ème} Congrès de l'UISPP à Liège en septembre 2001 par B. Mafart et H. Delingette (MAFART *et al.*, 2002), montrant ainsi l'arrivée au stade de nouvelle discipline scientifique l'Anthropologie Virtuelle, « Virtual Anthropology » (WEBER *et al.*, 2001, 2002 ; MAFART, 2002 ; MAFART *et al.*, 2002, 2004 ; ZOLLIKOFER *et al.*, 2002a ; BRUNER, 2004).

I.2.3 Modélisation tridimensionnelle

I.2.3.1 Etude des structures internes et modélisation 3D du crâne

La compréhension de la structure squelettique sur un plan ontogénique et sur un plan évolutif, nécessite de connaître le développement des structures internes de l'os et, pour le crâne, celui des éléments endocrâniens.

I.2.3.1.1 Etude de la structure interne de l'os

L'analyse détaillée de l'architecture interne des os, ou réseau trabéculaire, ne peut être réalisée par les méthodes classiques en raison de différentes contraintes méthodologiques : faible résolution d'images, et/ou des protocoles invasifs destructeurs.

Fajardo et Müller ont été les premiers en 2001 à appliquer la méthode des micro-scanners (μ CT-Scans) à l'étude de ces structures et leurs implications dans le type d'activité locomotrice. Ainsi, les auteurs ont montré le potentiel de cette technique sur les scanners médicaux normaux. Elle permettrait une estimation plus fine des rapports volumiques (calculés automatiquement) ainsi que le degré d'anisotropie (indice du sens des tensions exercées sur l'os). Les résultats préliminaires obtenus par les auteurs laissent supposer une différenciation fiable en présence d'une population d'étude conséquente. Le point le plus important réside dans la prise de mesures automatisées. Par contre, le fait d'être obligé de réaliser une biopsie est gênant dans le cadre de fossiles.

En 2002, Fajardo *et al.*, ont étudié la fiabilité de la tomographie à haute résolution avec des scanners à rayonnement X (HRXCT) pour l'analyse de la structure trabéculaire de l'os. Parmi les résultats, l'équipe a montré que les coupes scannérisées étaient aussi précises que les coupes histologiques et justifiaient l'abandon de techniques intrusives destructrices. De plus, les chambres d'acquisition des données sont plus grandes que celles des μ CT et sont capables d'accueillir des ossements plus grands (500 x 700 mm). Par contre, ils ont constaté que la qualité d'analyse dépendait grandement de la qualité de seuillage des images numériques, problème rencontré dans d'autres champs d'application des scanners.

I.2.3.1.2 Etude de l'endocrane

Avant l'avènement des technologies d'imagerie numérique, l'étude de l'endocrane était limitée à deux méthodes :

1/ l'utilisation de radiographies à rayonnement X classiques (SMITH *et al.*, 1999) préservant l'intégrité du fossile, mais qui en cas de haute minéralisation ne rendait aucun résultat exploitable (radio-opacité) ;

2/ des techniques exploratoires nécessitant le décapage de la matrice avec altération surfacique et perte des moulages endocrâniens naturels (TOBIAS, 2001).

Après avoir étudié les coupes scanners comme des radiographies (OKAMOTO *et al.*, 1996) il est désormais possible d'obtenir un endocrane virtuel permettant d'étudier les réseaux méningés cérébraux.

En 1997, Semendeferi *et al.* ont étudié l'évolution du lobe frontal chez les Hominoïdes, sa taille, ses proportions, au moyen de coupes IRM et de reconstructions tridimensionnelles. L'étude n'a porté que sur des espèces actuelles, mais elle est source d'informations pour les Hominidés fossiles. L'étude suggère que depuis la séparation de toutes les familles d'Hominoïdes, les lobes frontaux de la cavité cérébrale n'ont quasiment pas changé en proportion. Il n'y aurait qu'un accroissement de taille générale.

Lieberman (1998) a étudié la réduction de la partie antérieure du sphénoïde dans la diminution de la projection de la face chez les *Homo sapiens* au moyen de radiographies et de coupes scanners. Spoor *et al.* (1999) ont montré que des résultats et leur interprétation, pouvaient dépendre de la qualité des prises de vue réalisées ainsi que de la taille de la population étudiée. Au final le sphénoïde antérieur ne serait pas plus court chez les *Homo sapiens* que chez les autres *Homo* archaïques.

Plusieurs équipes ont étudié les coupes CT et la reconstruction tridimensionnelle de l'endocrâne et de l'exocrâne de l'*Homo erectus* Modjokerto (COQUEUNOT *et al.*, 2004; BALZEAU *et al.*, 2005).

Une étude complète de l'endocrâne de Ceprano 1 a été réalisée en 2005 par Bruner *et al.*, avec analyse des réseaux méningés, des sinus, du volume endocrânien.

Au niveau archéologique, les scanners à rayonnement X permettent d'étudier anthropologiquement des momies (ROBSON BROWN *et al.*, 1999) sans méthodes invasives et sans radiographies classiques (utilisées depuis 1898 avec Sir Petrie), par trop limitées au niveau du nombre de plans de coupe.

I.2.3.1.3 Calcul des volumes

Le développement de ces technologies numériques a permis l'estimation des volumes endocrâniens de crânes complets ou crânes fragmentaires (RECHEIS *et al.*, 1999). Zollikofer et Ponce de Léon (2000) ont montré l'intérêt de la comparaison morphométrique pour déterminer le volume cérébral en calculant ceux des spécimens fragmentaires de Gibraltar 2 et Le Moustier 1.

Conroy *et al.* (1998) ont utilisé une reconstruction tridimensionnelle afin de calculer le volume endocrânien d'un hominidé ancien (Stw 505) de Sterkfontein, attribué à *Australopithecus africanus*. Les chercheurs ont comparé les volumes endocrâniens calculés différemment : 1/ à partir d'une reconstruction tridimensionnelle ; 2/ directement sur les coupes scanners en haute résolution (de 1 mm d'épaisseur) ; 3/ avec des méthodes classiques

(eau et moulages). Des valeurs précises n'ont été obtenues qu'à partir des deux premières techniques. Autre point, les crânes plus petits présentent paradoxalement des volumes crâniens supérieurs, après calcul par des méthodes classiques. Il semble nécessaire de réétudier certains fossiles tridimensionnellement.

D'autres travaux (CONROY *et al.*, 2000a, 2000b) ont permis d'estimer, dans les mêmes conditions de travail, un volume de 420 cm³ pour Sts 71 (*Australopithecus africanus*) et de 1250 cm³ pour l'*Homo heidelbergensis* de Bodo. Il s'agit dans les deux cas de valeurs moyennes en raison de l'absence d'une partie du crâne. Conroy *et al.* (2000a) ont réévalué différents crânes dont une série de *Paranthropus boisei* et *P. robustus*. Les valeurs de la capacité crânienne obtenues par l'analyse tridimensionnelle se sont avérées inférieure à celles précédemment publiées, confirmant Conroy *et al.* en 1998.

A l'opposé de ces travaux, Marquez *et al.* (2001) ont calculé le volume endocrânien de Sambungmacan 3 en utilisant des liquides, ainsi que les techniques numériques (coupes CT de 5 mm de moulages endocrâniens) et des mesures prises sur chacune des coupes. L'endocrâne, n'a été étudié qu'à travers des moulages et non des reconstitutions virtuelles. Par contre, d'autres coupes CT de 1 mm ont été réalisées pour modéliser le crâne et calculer des angles crâniens.

I.2.3.1.4 Etude de l'oreille interne

L'étude de l'oreille interne présente un intérêt croissant en paléoanthropologie, les canaux semi-circulaires permettant d'estimer la stature ainsi que le type de locomotion d'un individu fossile (WIND *et al.*, 1988 ; SPOOR *et al.*, 1994 ; THOMPSON *et al.*, 1998).

Les relations entre la verticalisation de la tête avec l'acquisition d'une station érigée bipède permanente, l'évolution morphologique du crâne et la morphologie de l'oreille interne sont complexes (WIND *et al.*, 1988 ; SPOOR *et al.*, 1994 ; SPOOR *et al.*, 1996 ; SPOOR *et al.*, 1998 ; DAMBRICOURT MALASSE *et al.*, 2000a, 2000b). La visualisation de ces structures intra-osseuses n'est quasiment possible que grâce à la tomodensitométrie à rayons X (WIND *et al.*, 1988 ; SPOOR *et al.*, 1995), leur analyse tridimensionnelle apportant des arguments de spéciation (HUBLIN *et al.*, 1996 ; SPOOR *et al.*, 1998 ; THOMPSON *et al.*, 1998 ; PONCE de LEON, 1999 ; SPOOR *et al.*, 2003).

En 1994, Spoor *et al.* ont comparé, au moyen de scanners à haute résolution, la morphologie de l'oreille interne d'Hommes modernes, de Grands Singes actuels et d'Hominidés fossiles. La morphologie actuelle des canaux semi-circulaires n'apparaîtrait

qu'avec *Homo erectus*. Ils ont interprété la morphologie des Grands Singes comme étant la résultante de la forme ancestrale. Les Australopithèques étudiés présenteraient cette même conformation que les Grands Singes, validant ainsi l'idée de bipédie occasionnelle. Certains fossiles (Stw 53) présentent des caractères propres, non attribuables à un style de locomotion (bipédie occasionnelle ou permanente) particulier. L'idée majeure ressortant de ce travail est le lien posture – type de locomotion avec la forme des canaux semi-circulaires au sein du labyrinthe (SPOOR *et al.*, 1994; SPOOR *et al.*, 1996).

Dambricourt-Malassé *et al.* (2000b) ont travaillé avec un autre échantillonnage fossile en faisant ressortir l'existence de trois groupes (Grands singes, *Homo* archaïques et *Homo sapiens*) en se fondant sur la flexion sphéno-occipitale et la forme des canaux semi-circulaires. Mais l'imagerie scanner n'a servi que pour les mesures, sans modélisation tridimensionnelle.

Hublin *et al.* (1996), ont essayé de déterminer la position phylétique d'un des spécimens d'Arcy-sur-Cure présentant un labyrinthe pour déterminer s'il s'agit d'un Néandertalien ou d'un *Homo sapiens*. Ils ont étudié la morphologie néandertalienne et l'ont comparée aux formes déjà analysées et ont constaté une différence nette entre les Néandertaliens et la forme *Homo erectus* – *Homo sapiens*. Les Néandertaliens, auxquels le fossile a été associé, semblent avoir développé des apomorphies différentes, différentes des modèles admis précédemment. Hublin *et al.* (1996) ont montré ainsi l'intérêt de la méthode pour la détermination phylétique mais aussi la complexité des relations entre les différentes structures anatomiques dans le cadre de l'équilibre et du mouvement.

L'analyse virtuelle de l'oreille interne du néandertalien Le Moustier 1 est source de discussion entre deux équipes (THOMPSON *et al.*, 1998 ; PONCE de LEON, 1999), la première voyant des structures comparables à celles des autres néandertaliens tandis que la seconde note une ressemblance de certains caractères mais des données morphométriques correspondant plus à celles des Hommes modernes.

Désormais, l'étude de l'oreille interne est préconisée pour toutes les espèces animales au moyen des scanners haute résolution (SPOOR *et al.*, 2002), méthode permettant une reconstitution fine et précise des canaux semi-circulaires.

En 2003, Qiu *et al.* ont repris une technique de modélisation tridimensionnelle (SMITH *et al.*, 1996) sortant des techniques usuelles. Smith *et al.* (1996) ont procédé à la « plastination » de têtes humaines (déshydratation, imprégnation de résines, coupes,

numérisation) pour étudier l'organe voméro-nasal. Le même procédé a été repris par Qiu *et al.* (2003) (produits et numérisations différents). Les différentes portions de l'os temporal et des zones intra temporales sont modélisables complètement ou sélectivement au moyen d'une série d'algorithmes comme les « marching cubes ».

Cette méthode d'acquisition et de modélisation, présentée comme une source de données pour l'apprentissage des chirurgiens ou des anatomistes, ne peut être appliquée à l'étude des fossiles mais est intéressante dans l'établissement d'une reconstitution moyenne des structures osseuses actuelles ou des organes internes et leur développement.

Rook *et al.*, en 2004 ont étudié un fragment d'*Oreopithecus bambolii* présentant l'os pétreux gauche. L'oreille interne (labyrinthe osseux) a été modélisée via des micro-coupes transversales scannérisées (μ CT-scan) puis comparée à celles de Grands Singes du Miocène, présentées dans les travaux de Spoor *et al.* (1998). Ce travail rapprocherait anatomiquement les Oréopithèques aux Grands Singes éteints (ROOK *et al.*, 2004). Mais la reconstitution tridimensionnelle n'a servi qu'à renseigner sur la forme des canaux. Les mesures ont été prises sur des images planaires après reformatage et non directement sur l'image virtuelle. Celle-ci n'a qu'un but descriptif et se trouve être une source d'information pour une étude dite classique.

Il ressort dans la majorité des cas une incapacité d'exploitation directe des reconstitutions virtuelles afin d'obtenir des mesures ou des données morphométriques. Le chercheur se retrouve obligé d'effectuer des conversions 2D afin de procéder à la prise de données. Par contre, ces reconstitutions s'avèrent indispensables pour étudier ces structures internes sans toucher à l'intégrité de la pièce osseuse et obtenir une vision globale de la structure osseuse.

I.2.3.1.5 Etude des sinus

L'étude des sinus frontaux présente, selon Nambiar *et al.* (1999), un intérêt dans le cadre de la reconnaissance d'individus non directement identifiables. Le caractère aléatoire de la formation de ces sinus en fait une structure unique, propre à chacun. Mais contrairement à Reichs (1993) qui a utilisé des scanners médicaux, Nambiar *et al.* (1999) préconisent l'utilisation des radiographies à rayonnement X pour étudier la morphologie des sinus. Il ne s'agit alors que d'une utilisation descriptive. En 2001, Marquez *et al.*, ont utilisé des coupes

CT de 1mm pour étudier les sinus de Sambungmacan 3 tout comme Seidler *et al.* pour Petralona et Kabwe (Broken Hill ; SEIDLER *et al.*, 1997 ; PROSSINGER *et al.*, 2000).

Rae et Koppe (2002), grâce à des mesures réalisées sur de reconstitutions de coupes CT, ont étudié et comparé l'évolution des sinus maxillaires chez les primates catarrhiniens, suivant une approche critique des théories précédemment émises.

I.2.3.1.6 Calcul des épaisseurs et de la surface crânienne

En 2000, Weber *et al.*, ont procédé au calcul semi automatisé de l'épaisseur de l'os occipital via des coupes scanners CT. L'expérimentateur devait définir un premier point d'étude à partir duquel un algorithme calculait l'épaisseur de points environnants, points qui devenaient eux-mêmes les points de base suivants. La méthode était donc dépendante du jugement du paléontologue pour définir un point adéquat, car selon le point sélectionné, des zones pouvaient être ignorées. L'épaisseur (et la morphologie) de l'os occipital n'aurait pas fait l'objet de pression évolutive depuis un million d'années. Mais les résultats sont à pondérer en raison de la taille de l'échantillon de comparaison (12 individus) et de la présence d'un seul individu fossile.

Friess *et al.* (2002) ont utilisé des scanners lasers et des coupes CT pour étudier le rapport volume/surface de la voûte crânienne.

I.2.3.1.7 Matrice sédimentaire

Les fossiles et plus particulièrement les crânes, sont souvent liés à des sédiments divers (sable, cailloutis, calcaire), déposés en surface ou internes.

Au travers de l'étude d'un individu du Néolithique, Bruner et Manzi (2003a) montrent l'intérêt de l'utilisation des reconstitutions virtuelles dans l'analyse et la description de restes humains, mais aussi les limites. L'application de filtres sur la reconstitution n'a pas permis de dissocier totalement l'os des sédiments. Les fractures anciennes ont été dissociées de celles liées à la fouille à partir de la modélisation et des coupes scanners. La modélisation virtuelle n'est que descriptive, apportant un complément d'information.

En 2003, Prossinger *et al.* ont étudié virtuellement l'*Homo heidelbergensis* de Steinheim. Après modélisation tridimensionnelle des données issues de coupes CT, les auteurs ont appliqué des séries de filtres avec divers seuillages et ont enlevé virtuellement les sédiments endocrâniens ainsi que ceux inclus dans les sinus faciaux. La suppression de ces sédiments a permis d'avoir accès aux structures internes, de les décrire et d'analyser les déformations.

I.2.3.2 Pathologies et Paléopathologies

Les paléontologues peuvent aussi utiliser l'imagerie numérique pour étudier les éventuelles lésions pathologiques non visuellement décelables sur les restes fossiles (FOX *et al.*, 1995).

L'analyse d'images obtenues par scanner CT a permis de montrer la présence d'une fracture ante-mortem sur les restes crâniens du Néandertalien Le Moustier 1 (PONCE de LEON *et al.*, 1999) tout comme sur ceux de St Césaire 1 (ZOLLIKOFER *et al.*, 2002b).

Le développement de la technique de Multislice-CT semble permettre de meilleurs diagnostics sur les lésions crâniennes (RÜHLI *et al.*, 2002). En 2003, Braüer *et al.* ont, à partir de l'analyse de coupes CT de 1 mm, diagnostiqué, en se fondant sur des structures internes de l'os, que le crâne d'*Homo sapiens* Eliye Springs, Kenya, correspondait à celui d'un individu ayant souffert d'anémie chronique durant sa jeunesse.

I.2.3.3 Compensation des déformations et reconstructions virtuelles

Comme pour l'utilisation des radiographies à rayonnement X et des scanners CT, la paléontologie adapte des techniques mises au point dans d'autres domaines scientifiques comme la Médecine. En raison des différentes déformations taphonomiques et de l'érosion, de nombreux restes osseux se retrouvent fragmentaires et/ou déformés (compression, torsion). Il fallait précédemment réaliser des montages complexes à partir de moulages. Avec le développement de l'outil virtuel il est possible de procéder à des réassemblages sans porter atteinte à l'intégrité du fossile.

En 1995, Kalvin *et al.* ont procédé à la réalisation d'un crâne chimérique en juxtaposant virtuellement des restes crâniens de deux spécimens africains du Pléistocène Moyen afin d'obtenir une forme consensus. Cet assemblage virtuel est l'un des premiers essais de reconstruction virtuelle d'Hominidé fossile.

Thompson *et al.* (1998) et Ponce de Leon *et al.* (1999) ont proposé une reconstruction virtuelle du crâne néandertalien Le Moustier 1 en utilisant les mêmes techniques d'acquisition numérique (μ CT). Les deux équipes ont numérisé les originaux, enlevé les traces de colles ainsi que les ajouts, puis ont procédé au réassemblage virtuel en compensant les déformations qu'avait subi le fossile après dépôt. Les deux équipes ont obtenu des reconstitutions d'aspect similaire, mais différentes métriquement. Ces différences mettent en évidence l'importance du facteur humain (interprétation des déformations et méthodologie d'articulation des fragments) lors des reconstructions tridimensionnelles.

Zollikofer *et al.* (1998, 2000) ont assemblé les fragments crâniens de l'enfant de Gibraltar (Devil's Tower) et créé virtuellement par symétrie sagittale les portions complémentaires des restes osseux présents. L'assemblage a été basé sur certains caractères anatomiques (oreille interne) pour l'orientation spatiale des os.

Braun *et al.* (1999) ont restauré le crâne de Steinheim en découpant puis en réassemblant virtuellement les os pour compenser les déformations. Les zones manquantes ont été symétrisées.

Conroy *et al.* (2000b) ont procédé à la reconstruction du crâne de Bodo (*Homo heidelbergensis*) à partir de coupes scanners. Ils ont découpé le crâne virtuel en trois portions au sein desquelles ils ont choisi à chaque fois la portion présentant les structures les mieux conservées puis ont procédé à leur symétrisation ("mirroring"). Le problème dans cette méthode réside dans le fait que l'expérimentateur est lié aux structures qu'il possède. Si un os déformé est symétrisé, il y aura amplification de la déformation. Un autre crâne (Sts 71) a été reconstitué par symétrie sagittale (CONROY *et al.*, 2000a).

Voigt *et al.* (2000) ont symétrisé virtuellement un crâne pour compenser une lacune osseuse. Puis l'équipe a obtenu par stéréolithographie la portion manquante.

En 2002, Zollikofer *et al.* ont travaillé sur le Néandertalien de St Césaire 1 après numérisation par scanners CT. L'état de conservation des ossements n'a pas permis de désassembler manuellement les fragments crâniens restants. Ces pièces ont été séparées virtuellement et assemblées pour compenser les déformations taphonomiques (ZOLLIKOFER *et al.*, 2002b).

Certaines estimations (âge) ne peuvent être réalisées seulement à partir du fossile, ce qui nécessite une association des techniques traditionnelles et modernes (THOMPSON *et al.*, 2002).

En 2005 deux travaux différents de compensation de déformations taphonomiques ont été réalisés. Vialet *et al.* ont proposé une reconstitution virtuelle du crâne d'*Homo erectus* de Yunxian 2 après déformation libre des polygones ainsi qu'une symétrisation des parties les mieux préservées. Zollikofer *et al.* (2005) ont travaillé sur les restes de *Sahelanthropus tchadensis* (BRUNET *et al.*, 2002) en découpant virtuellement et en remplaçant les fragments les uns par rapport aux autres.

L'attribution d'un visage aux Hominidés fossiles est également étudiée en paléoanthropologie. Alors que les techniques de reconstructions faciales classiques (épaisseur des tissus) sont encore utilisées avec un rendu non négligeable (KUSTAR, 1999), de

nombreux travaux informatiques essayent de plaquer un visage sur les crânes fossiles (QUATREHOMME *et al.* 1997 ; VIGNAL, 2000a, 2000b ; KÄHLER *et al.*, 2001 ; ODIN *et al.*, 2002 ; SUBSOL *et al.*, 2000, 2002).

I.2.3.4 Réalisation de stéréolithographies

Depuis les débuts de la paléontologie, les chercheurs réalisent des moulages des ossements découverts afin de les préserver et de pouvoir travailler sur des versions plus solides que les originaux. Leur réalisation pose divers problèmes : 1/ Impossibilité sur un crâne complet de conserver les surfaces internes; 2/ Le moulage prend en compte la matrice minérale; 3/ De nombreux fossiles, altérés ou fragmentés, s'avèrent extrêmement fragiles et un seul moulage s'avère possible. Ceci amène alors à faire des moulages de moulages, entraînant l'altération de l'information qui est censée être préservée.

Les techniques de prototypage utilisées dans l'industrie (aéronautique, automobile,...) sont adaptables à la paléontologie. Découvert en 1991, l'Homme des glaces, Ötzie, a été scanné par hélice CT puis reconstitué virtuellement, ce qui a permis d'étudier les organes momifiés de cet individu et d'essayer de déterminer les causes de la mort. Une stéréolithographie du crâne (la première d'un crâne humain) a été réalisée en 1994 (RECHEIS *et al.*, 1999).

Les chercheurs peuvent à partir d'un fichier numérique obtenir une matérialisation concrète et palpable des données. Cette stéréolithographie (obtenue par chauffage de poudre ou résines au moyen de lasers ; SANTLER *et al.*, 1998) peut être utilisée pour analyse (LYNNERUP *et al.*, 1997 ; Z'GRAGGEN *et al.*, 2001) et est diffusable. Le fossile original est alors préservé.

Cette technique permet de créer des copies dont la taille ou la forme peuvent être modifiées par rapport à l'original (obtention de reconstitutions agrandies de l'oreille interne, de cavités sinusales, de moulages endocrâniens, « d'écorchés » ; SEIDLER *et al.*, 1997) et ceci avec une bonne résolution (SANTLER *et al.*, 1998).

La stéréolithographie permet surtout de conserver de manière durable une proposition de reconstitution issue d'un travail virtuel. En 1997, Seidler *et al.* ont réalisé et comparé deux stéréophotographies d'Hominidés du Pléistocène moyen, Petralona et Kabwe (Broken Hill), toutes deux obtenues après réalisation de coupes CT de 1mm et reconstitution virtuelle. Ils ont pu notamment comparer ainsi les cavités sinusales des fossiles et mettre en évidence leur extrême développement par rapport à celles d'autres fossiles. Les reconstitution des crânes Le

Moustier 1 (PONCE de LEON *et al.*, 1999) et Yunxian 2 (VIALET *et al.*, 2005) ont été stéréolithographiées. La qualité de ces stéréolithographies ne cesse de s'améliorer du fait de l'amélioration du rendu des reconstructions virtuelles (SPOOR *et al.*, 2000). Nous passons alors d'une réalité virtuelle à une virtualité palpable (ZOLLIKOFER *et al.*, 2000).

I.2.4 Etudes Procustes et Morphométrie géométrique

Avec la modélisation tridimensionnelle, une autre approche de la paléanthropologie a pu être développée, la morphométrie (RICHTSMEIER *et al.*, 1992). Plus phénotypique que l'approche phylogénétique, la morphométrie est basée sur une comparaison statistique de groupes d'individus en se basant sur des caractères morphologiques (parfois comparable que qualitativement) et morphométriques. Pendant des années, la technique a été fondée sur des analyses de mesures linéaires (morphométrie traditionnelle) avec des interprétations complexes des résultats et tenant compte difficilement des différences géométriques du crâne.

Morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique tridimensionnelle (BOOKSTEIN, 1996, 1997a, 1997b ; ROHLF, 1996 ; SLICE *et al.*, 1996 ; O'HIGGINS *et al.*, 1998 ; O'HIGGINS, 2000 ; RICHTSMEIER *et al.*, 2002) qui utilise les coordonnées de points de repères homologues, apparaît appropriée pour l'analyse des formes d'une structure complexe telle que le crâne. La superimposition Procuste de points de repères (landmarks) permet des comparaisons architecturales. Séparer la taille de la forme durant l'étude autorise la possibilité d'étudier les relations entre la taille et la forme (allométrie) et permet de prévenir les confusions dues aux différences de taille et de forme. Séparer la taille signifie que les données obtenues correspondent à des crânes ayant désormais la même taille (mesures en proportion). Cette technique permet une facilitation des comparaisons morphologiques des fossiles.

L'Engle Williams et Richtsmeier (2003) ont montré que des points de repères pouvaient être sélectionnés sur des reconstitutions virtuelles avec une grande précision. Suivant les caractères étudiés, les auteurs modélisent le contour sagittal (BRUNER *et al.*, 2002a ; MANZI *et al.*, 2000, 2001a ; BABA *et al.*, 2003 ; BOOKSTEIN *et al.*, 2003) ou les contours tridimensionnels de la zone osseuse concernée (CHALINE *et al.*, 1998 ; O'HIGGINS *et al.*, 1998 ; BRUNER *et al.*, 2001, 2002b, 2003b ; HARVATI, 2002, 2003a, 2003b, BRUNER, 2003 ; HARVATI *et al.*, 2004 ; PENIN *et al.*, 1999).

Les points doivent être homologues et refléter l'architecture tridimensionnelle du crâne ainsi que celle des ossements isolés. Bookstein (1991) distingue trois types de points :

1/ De type I, points à homologie rigoureuse, situés à l'intersection d'éléments architecturaux (bregma, lambda, astérion...) ;

2/ De type II, points situés à la terminaison des structures ou à la courbure maximale (point oral, basion, staphylion, hormion, opisthion,...) ;

3/ De type III, points contraints en termes d'homologies, situés en zone de courbure maximale (point sous orbitaire), entièrement construits, choisis par l'expérimentateur.

Une nouvelle approche, « Singular Warp Analysis » (variante de la méthode des moindres carrés) est préconisée par Bookstein *et al.* (2003) afin de mieux distinguer les corrélations entre les régions étudiées.

Bookstein *et al.* (1999) ont mis en évidence une stabilité du contour endocrânien de l'os frontal alors que le profil exocrânien variait dans le plan sagittal des *Homo heidelbergensis* aux *Homo sapiens*. La partie antérieure de la cavité cérébrale semble rester constante sur près d'un demi million d'années. Seule la combinaison de la modélisation tridimensionnelle et de la morphométrie Procuste permet cette analyse. L'effectif fossile est assez faible (5 *H. heidelbergensis* / *neanderthalensis* et 16 *H. sapiens*) et les points manquants ont été estimés via la méthode des Thin-Plates Splines ou « plaques minces » en se basant sur les autres crânes.

Penin *et al.* (1999, 2002) ont montré via une superposition Procuste de points que le développement du torus supra-orbitaire chez *Pan* est en partie attribuable aux rapports entre les cavités orbitaires et l'écaille du frontal, et était indépendant de l'orientation du palais.

Détroit (2000, 2002) a réalisé une étude morphométrique géométrique de fossiles d'*Homo habilis* à *Homo ergaster*, d'*Homo erectus*, ainsi que de crânes d'*Homo sapiens* récents à partir d'hémi-crânes modélisés. L'étude indique une non-continuité phylétique des fossiles d'*Homo erectus* asiatiques et des populations locales actuelles. Les différences entre KNM-ER 1813 (*Homo habilis*) et les *Homo ergaster* africains ne correspondraient qu'à une différence de taille. Millet (2000) a analysé l'ontogénie crânienne de *Pan troglodytes* et de *Gorilla gorilla* en utilisant des landmarks sagittaux et latéraux pour modéliser le profil ainsi que certaines structures crâniennes. L'absence de certains points chez les formes juvéniles a conduit à simplifier la modélisation. Certaines équipes ont réalisé des essais d'extractions et de comparaisons automatiques des lignes de crête à partir de scanographies (DECLERCK *et al.*, 1995 ; SUBSOL *et al.*, 2000, 2002). Des travaux de déformation d'image (morphing) à vocation muséologique ont aussi été réalisés sur des fossiles (MAFART *et al.*, 1999).

Friess (2000) a étudié au moyen de la méthode des plaques minces (Thin-Plates Splines), une grille de déformation en 2D, l'évolution de la forme crânienne des Hominidés de la fin du Pléistocène. Les résultats mettent en opposition la conformation néandertalienne ainsi que celle de certains fossiles africains contre celle des Hommes modernes.

Manzi *et al.* (2000) ont comparé par la méthode des plaques minces, d'une série de profils sagittaux de crânes fossiles de genre *Homo*. Le travail semble montrer deux phénomènes :

1/ Une modification brutale et rapide d'une forme archaïque à une forme moderne en peu de temps, et ce de manière localisée ;

2/ Les formes précédentes auraient toutes eu un accroissement cérébral, mais de différentes manières suivant la région. Cette conclusion est confirmée par un travail sur l'encéphale avec une modélisation simplifiée de l'endocrane sur une série similaire d'Hominidés fossiles (BRUNER *et al.*, 2002a, 2003b).

Manzi *et al.* (2001a) ont travaillé sur les Néandertaliens Saccopastore 1 et 2. Après reconstruction 3D à partir d'images CT, le seuillage des matrices minérales a permis d'étudier les cavités sinuales ainsi que l'endocrane (MANZI *et al.*, 2001a). L'endocrane de Saccopastore 1 a été comparé par morphométrie géométrique (Thin-Plates Splines en 2D) avec ceux d'autres Hominidés, confirmant qu'il présentait des traits de type néandertalien (BRUNER *et al.*, 2002a), archaïques par rapport aux Hommes modernes (BRUNER *et al.*, 2003b). Un autre travail a porté sur la face de spécimens proto-historiques du Maghreb avec modélisation des cavités orbitaires et nasales et du malaire (BRUNER *et al.*, 2002b).

La redécouverte de la calvaria de Sungbun 3, ponctuellement égaré, a été l'occasion d'une analyse morphométrique géométrique (DELSON *et al.*, 2001). Les auteurs ont utilisé des semi-landmarks pour modéliser le profil sagittal (projection 2D) de cet hominidé et le comparer par superimposition à ceux d'autres fossiles asiatiques et des individus modernes.

Guy *et al.* (2003) ont combiné les superimpositions Procrustes, TPS et Analyses en Composantes Principales pour comparer l'anatomie maxillo-faciale d'Hominoïdes. Cette somme des analyses permet de définir plus précisément les différences morphologiques.

Mitteroecker *et al.*, (2004) et Gunz *et al.*, (2004) ont utilisé des semi-landmarks afin de comparer ou de reconstruire virtuellement des crânes. L'utilisation de ces points intermédiaires permet de mieux modéliser la surface d'une structure à étudier, mais nécessite une intégrité surfacique pour les comparaisons et/ou un effectif important pour reconstruire des crânes fragmentaires. Jeffery *et al.* (2004) ont réalisé des comparaisons en TPS de coupes

IRM, afin d'étudier l'ossification sagittale de la base du crâne. Le choix des points de repères à partir des coupes et non d'une modélisation tridimensionnelle limite cette étude à une comparaison en deux dimensions.

L'analyse Procuste permet d'étudier l'ontogénie en comparant des individus au même stade de croissance. En 2001, Ponce de Leon *et al.* ont comparé par analyse Procuste une série virtuelle de Néandertaliens (de 6 mois à l'âge adulte) et des crânes modernes d'âges équivalents. Des différences ont été relevées tôt dans l'ontogénie, avant un développement similaire. Cette différenciation précoce suggère aux auteurs une divergence spécifique. Les déformations étaient présentées sur des crânes consensus au moyen de vecteurs.

Ainsi, après l'ontogénèse (développement individuel), la phylogénèse (spéciation) et la diagenèse (fossilisation), il est possible de mettre en évidence une 4^{ème} dimension spatiale pour l'étude des fossiles, la dimension temporelle (ZOLLIKOFER *et al.*, 2002a) qui permet d'analyser les effets du temps sur la morphologie des fossiles selon les 3 dimensions précédentes.

Certains travaux se focalisent sur la position phylétique des Néandertaliens. Harvati (2002, 2003a, 2003b) a montré morphométriquement (superimposition Procuste) et statistiquement que l'os temporal néandertalien (12 sujets) était significativement et spécifiquement différent de celui des Hommes. En 2004, Harvati *et al.* ont modélisé un hémicrâne simplifié. Les conclusions sont similaires à celles précédentes, isolant encore un peu plus l'Homme de Neandertal dans la phylogénie Humaine. Cependant la taille de la population néandertalienne analysée est limitée (5 crânes) et il y a absence d'espèces plus anciennes (*Homo heidelbergensis*, *Homo erectus*).

Vialet (2005) a modélisé tridimensionnellement l'évolution de la face supérieure et moyenne d'Hominidés fossiles au moyen de points de repères craniométriques. L'auteur a constaté une convergence de conformation de la face de Petralona et AT405 avec les *Homo heidelbergensis* d'Afrique.

Une comparaison par méthode Procuste de l'os frontal des *Homo heidelbergensis* d'Europe et des *Homo neanderthalensis* (GUIPERT *et al.*, sous presse) n'a pas permis pas de distinguer une cladogénèse ou une anagénèse lors de la transition *Homo heidelbergensis* – *Homo neanderthalensis* en Europe. Par contre l'étude démontre une nette différence d'organisation de l'os frontal de ces espèces vis-à-vis de l'Homme moderne. L'étude a porté sur un effectif réduit en raison d'un nombre important de points de repères.

Ces travaux de comparaison Procuste ne concernent en général que des modélisations en deux dimensions (ROSAS *et al.*, 2002). De plus ces analyses ne présentent souvent qu'une seule modélisation tridimensionnelle.

I.3 Objectifs

Alors qu'Arago 21-47 (l'Homme de Tautavel) constituait en 1981 l'un des plus anciens et plus complets Hominidés d'Europe, les découvertes de nouveaux restes humains fossiles (Dmanissi, Ceprano, Gran Dolina) depuis les premières reconstructions de cet individu, ont modifié l'interprétation de sa position phylétique.

Nous avons utilisé les différents outils numériques évoqués précédemment pour préciser cette position phylétique en réétudiant les ossements originaux ainsi que les reconstitutions de ce spécimen au regard de ces dernières découvertes. Nous avons procédé à la réalisation d'une reconstruction virtuelle : Arago3D.

A l'aide de ces mêmes outils informatiques nous avons étudié les fragments inédits du spécimen Biache-Saint-Vaast 2 et proposé une première reconstitution virtuelle de ce fossile.

Ces deux travaux réalisés, nous avons comparé ces deux Hominidés du Pléistocène moyen à un ensemble d'Hominidés du Pléistocène au moyen de plusieurs comparaisons Procustes et autres analyses tridimensionnelles.

Nous proposons ensuite une position phylétique pour ces deux spécimens fossiles au sein des Hominidés, ainsi que leur place par rapport aux Anténéandertaliens et aux Néandertaliens. Nous voulons aussi étudier la validité de cette appellation d'Anténéandertalien par rapport aux nouveaux fossiles.

Chap. II : Matériels Paléanthropologiques

Après présentation des différents fragments crâniens, provenant de la Caune de l'Arago et du site de Biache-Saint-Vaast, pour lesquels une étude virtuelle est présentée par la suite, nous décrivons l'ensemble des Hominidés nous servant de référence lors des analyses tridimensionnelles.

II.1 Le crâne Arago 21-47 de Tautavel et ses différentes reconstitutions antérieures

II.1.1 Historique des découvertes et définition du crâne Arago 21-47

Fouillée depuis plus de 30 ans par le Professeur Henry de Lumley, la grotte de la Caune de l'Arago (Tautavel, France) contient plus de 100 restes humains, ossements de différents types et d'états de conservation divers. Le 21^{ème} reste, découvert le 22 juillet 1971 dans la couche baptisée « sol G », ensemble III (LUMLEY *et al.*, 1971, 1973), correspond à une face et un frontal, tous deux déformés post-mortem, soit de manière anthropique, soit lors de la sédimentation. En 1979, la partie postérieure d'un pariétal droit (Arago 47) a été découverte. Cette pièce appartiendrait au même individu, ainsi que deux autres fragments bregmatiques, droit et gauche (Arago 47A et Arago 3A).

Afin de distinguer le crâne fossile correspondant principalement aux fragments Arago 21 et 47 par rapport aux autres individus fragmentaires découverts dans ce site, nous appelons cet individu « Arago 21-47 ». L'expression crâne Arago 21-47 fait donc référence à cet individu.

Ces fragments ont fait l'objet de plusieurs reconstitutions. L'estimation pour la datation (YOKOYAMA, 1991) de ce niveau d'habitat donne une valeur proche de -450 000 ans.

Cet individu, d'abord décrit comme *Homo erectus tautavelensis* (LUMLEY *et al.*, 1973, 1985) est attribué phylétiquement aux *Homo heidelbergensis* (RIGHTMIRE, 1990, 1996, 1998 ; MANZI. *et al.*, 2001b).

Les fragments crâniens que nous avons étudiés sont conservés au CERP, à Tautavel.

II.1.2 Description des restes humains (Arago 21 – 47 – 47A – 3A – 3B – 78 - 79)

II.1.2.1 Le massif facial Arago 21

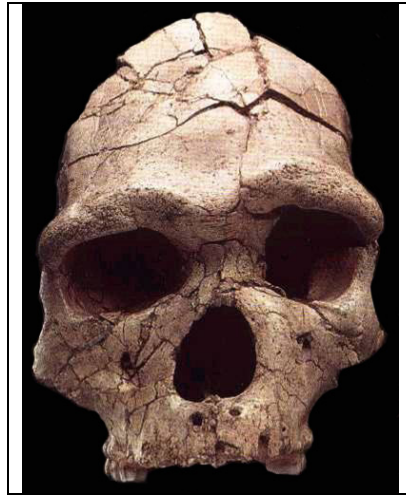


Figure 1 : Vue frontale du massif facial Arago 21.

Le fossile Arago 21 (figure 1) correspond à un massif facial complet, du maxillaire à la suture coronale, précédemment étudié par Lumley *et al.* (1971, 1973), J. Spitz (1982, 1984) et Ascenzi (1982 ; Ascenzi *et al.*, 1986). L'hémi-face gauche a été comprimée latéralement et présente, comme celle de droite, de multiples fractures. Les deux os maxillaires présentent un bourrelet externe au niveau des molaires. Le palais est relevé au niveau de la suture intermaxillaire par rapport au maxillaire supérieur. Ceci est dû à l'enfoncement de l'os maxillaire gauche. La zone maxillo-zygomatique présente une fosse canine plus proche morphologiquement des *Homo neanderthalensis* que des *Homo sapiens*. Le pourtour du trou sus-orbitaire droit est enfoncé. La cavité orbitaire droite est intacte et présente une forme rectangulaire légèrement oblique. Nous constatons l'individualisation de la portion supéro-interne de l'arcade orbitaire. De type intermédiaire II/III (classification de Cunningham, 1908), le torus encadre une dépression glabellaire surmontée d'une fosse supraglabellaire profonde. L'espace inter-orbitaire est large et le torus sus-orbitaire massif. Au niveau sus-orbitaire, la crête crânio-faciale du fossile Arago 21 présente un tracé général incurvé, vers le bas dans la région médiane, vers le haut au-dessus de l'angle supéro-interne de l'orbite. Au-dessus de l'orbite, la crête crânio-faciale présente un trajet arciforme, rendu irrégulier par la présence, au-dessus du tiers moyen de la cavité orbitaire, d'une zone aplanie, presque rectiligne, très oblique en bas et en dehors. Cette disposition est nettement différente de celle des Néandertaliens où le torus supra-orbitaire forme au-dessus de chaque orbite un arc dont la convexité est très régulière.

L'os frontal est entier mais fracturé. L'écaille frontale est traversée en largeur par une fracture allant d'une crête latérale à l'autre. Les bords de cette fracture sont jointifs sur le flanc droit de l'écaille alors qu'il y a discontinuité à gauche. Cette différence de niveau est due à la surrection du côté gauche par rapport au droit, suite à une pression latérale exercée sur le bord temporal du frontal (dont la suture coronale se retrouve en position interne par rapport à la crête latérale). Cette pression a engendré la principale fracture de l'os : un chevauchement du bord gauche sur le bord droit partant de l'intérieur de l'arcade orbitaire gauche au niveau de l'échancrure frontale interne, tournant vers le haut de l'écaille, passant entre l'apophyse orbitaire interne et l'arcade sourcilière gauche, puis se prolongeant postérieurement jusqu'au niveau de la fracture transversale. A ce niveau là, la fracture se scinde en deux rameaux parallèles jusqu'à la suture coronale. Il ne s'agit plus dans la partie supérieure de l'écaille d'un chevauchement des bords mais d'une série de relèvements et d'abaissements des fragments les uns par rapport aux autres. La pression latérale a généré au niveau de l'endocrâne une compression de la bosse orbitaire et de la fosse frontale gauche. La bosse orbitaire droite et la fosse frontale correspondante présentent des fractures sans discontinuité de l'os. La partie droite de l'écaille frontale supérieure présente aussi des fractures qui n'entraînent pas de discontinuité de l'os.

Dans l'ensemble, le frontal est aplati et allongé vers l'arrière, entre des crêtes latérales saillantes et pratiquement parallèles. La suture coronale en biseau est nette.

II.1.2.2 Les os pariétaux Arago 47 – 47A – 3A – 3B

Ces fragments ont été précédemment étudiés par Grimaud (1982a, 1982b).

- Arago 47 : La suture lambdatique de ce pariétal droit fracturé est entièrement conservée et présente des inclusions de petits os wormiens et/ou des fragments d'os occipital. L'extrémité postérieure de la suture sagittale est intacte depuis le lambda. La ligne temporale supérieure est large et aboutit à un torus angularis massif et relativement épais, à proximité de l'astérion. Les traces en biseau de la suture squameuse ont été conservées. Le bord antéro-inférieur entre la suture sphéno-pariétale et la suture coronale est manquant, tout comme le bord antéro-supérieur entre les sutures coronale et sagittale. Il y a possibilité d'articulation de la suture coronale (engrènement par une portion millimétrique) conservée sur Arago 47 avec la face Arago 21.

- Arago 47A : Angle antérieur gauche d'un pariétal droit, ce fragment correspond vraisemblablement au bord antérieur d'Arago 47 (une portion trapézoïdale est alors manquante entre les deux). Le lien entre les deux ne se fait qu'après avoir articulé les deux

fragments (47 et 47A) avec le frontal Arago 21. La suture coronale est préservée sur 18 mm, ainsi que la base de la suture sagittale (22 mm).

- Arago 3A : Décrit par M.-A. de Lumley en 1970 comme un fragment de pariétal, il s'agit probablement du bord antérieur droit d'un pariétal gauche plutôt que d'un fragment de bord postérieur (GRIMAUD, 1982). Cette détermination repose sur différents arguments : même texture exocrânienne (aspect piqueté) et endocrânienne, même épaisseur que le fragment Arago 47A, et correspondance possible des sutures sagittale et coronale avec Arago 47A et Arago 21.

- Arago 3B : Cette portion de pariétal n'a pu être articulée avec les autres fragments de l'Homme de Tautavel (Arago 21-47). Elle ne correspond pas à Arago 47 et ne comble pas la lacune sur cet os. Nous ne pouvons la relier à cet os via la suture sagittale et la différence d'épaisseur entre les deux os exclu cette hypothèse. Selon D. Grimaud (1982), il s'agirait d'un fragment situé sur la partie médiane de la suture lambdoïde droite. Il s'agirait donc d'un deuxième individu. Nous n'avons donc pas utilisé ce fragment dans le cadre de nos travaux.

II.1.2.3 Les fragments occipitaux Arago 78 – 79

Deux fragments d'os occipital (Arago 78 et 79) ont été identifiés parmi les restes humains découverts à la Caune de l'Arago. Ces deux fragments correspondent à l'extrémité antérieure de l'os occipital avec les deux condyles (très bien conservés à l'exception du bord antérieur du condyle droit) et l'apophyse basilaire. Arago 79 est le plus petit fragment et correspond au condyle gauche ainsi qu'au pourtour de l'échancrure jugulaire droite. Cette échancrure n'a pas été conservée sur Arago 78 mais le bord occipital de la suture sphénion – occipital a été préservé.

Ces fragments ne peuvent être attribués directement à l'individu Arago 21. Selon H. et M.-A. de Lumley (communication personnelle), nous considérons comme faisant partie du même individu (Arago 21-47) les fragments Arago 21, 47, 47A, 3A, 78, 79.

II.1.3 Les précédentes reconstitutions et propositions concernant le crâne Arago 21-47

II.1.3.1 Historique des reconstitutions et propositions

En 1981, H. et M.-A. de Lumley, en association avec R. David, ont réalisé une première reconstitution empirique à partir de moulages (figure 2). Les fractures et déformations visibles au niveau de la face et du frontal ont été atténuées. Les deux fragments

d'Arago 47 ont été réunis en comblant les lacunes. Le pariétal gauche a été obtenu par symétrie sagittale. La suture sagittale présente une convexité vers la droite. Pour remplacer les os temporaux manquant, les auteurs de cette reconstitution ont utilisé des moulages d'os du crâne Sangiran 17 (*Homo erectus*) et de l'os occipital de Swanscombe (*Homo heidelbergensis*). Les sutures lambdiques ont été rognées afin que l'occipital puisse être disposé entre les pariétaux, l'angle astérion – lambda – astérion obtenu n'étant que de 73°. Malgré ces modifications, il a été nécessaire d'intégrer un os wormien de forme triangulaire au niveau du lambda.

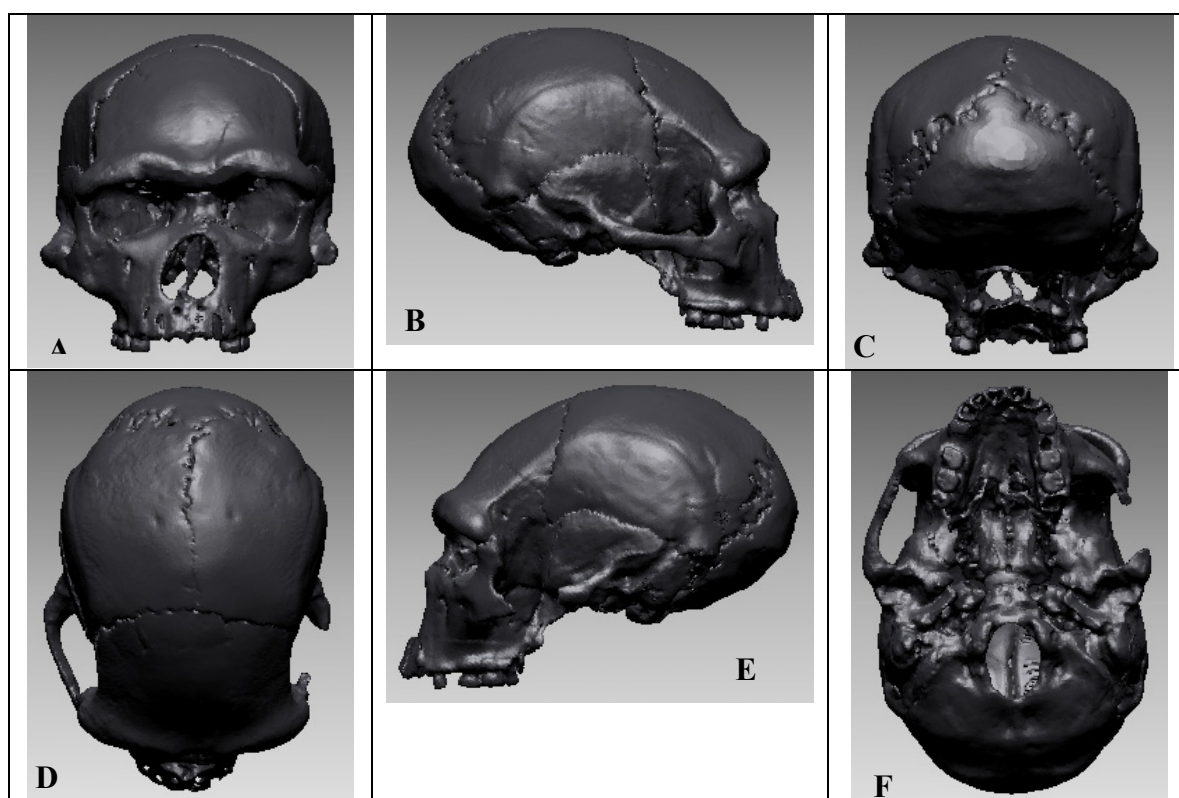


Figure 2 : Reconstitution Arago – Swanscombe 1981. Différentes vues ; A : de face ; B : profil droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : profil gauche ; F : inférieure.

Une autre reconstitution, par la même équipe, reprend les mêmes dispositions, à l'exception de l'utilisation de l'occipital fragmentaire de Vertesszöllös, sans reconstitution du foramen magnum et d'une grande partie du planum nuchal.

Lors du 1^{er} Congrès International de Paléontologie Humaine de Nice, Ascenzi (1982 ; Ascenzi *et al.*, 1986) a proposé diverses corrections des lésions post-mortem du massif facial Arago 21 au moyen de modèles mathématiques tridimensionnels. Le moulage utilisé du

massif facial a été découpé, fragmenté et réassemblé suivant ce modèle mathématique. Il ne semble pas avoir procédé à des modifications de positionnement du pariétal Arago 47.

Grimaud-Hervé et E. Spitery, ont proposé des modifications de la première reconstitution. Pour Grimaud-Hervé (1982b), la convexité de la suture sagittale ne serait connue sur aucun autre fossile ou individu actuel. Ceci pourrait résulter d'un os wormien interpariétal postérieur non retrouvé, ou d'un mauvais engrènement de la suture coronale sur les reconstitutions présentées. Elle a donc proposé de repositionner Arago 47 au niveau de la suture coronale en déjetant vers le haut et l'extérieur la partie postérieure du pariétal. En parallèle il serait nécessaire d'augmenter la largeur de la bande reconstituée afin que le fragment 47A soit toujours en contact au niveau du bregma. Tout ceci compenserait la concavité et l'angulation postérieure de la suture sagittale, et supprimerait l'os wormien lambdatique. La largeur biastérique ainsi que l'angle lambdatique pourraient alors rentrer dans la variabilité des *Homo erectus* d'Europe.

E. Spitery a suggéré en 1982 et dans sa thèse en 1984, que la largeur biastérique était sous-estimée. Le torus angularis sur le pariétal correspondrait à un torus occipital transverse plus marqué que celui de l'occipital de Swanscombe. La reconstitution utilisant l'occipital de Vertesszöllös serait plus appropriée. Pour l'auteur la présence d'un os wormien au niveau du lambda semble plausible, mais peu probable. E. Spitery (1982, 1984) a donc proposé d'accroître la largeur biastérique (donc l'angle astérion – lambda – astérion) de 5 à 10 mm et l'angle d'une dizaine de degrés par un allongement de la suture sagittale de quelques millimètres.

Dernier auteur d'une reconstitution, Vlček (1986) a utilisé sa propre restauration de la face d'Arago 21. Il a disposé les moulages d'os pariétaux et temporaux (Sangiran 17) suivant les mêmes angles que les deux premières reconstitutions de M.-A. de Lumley. Selon Vlček, cette reconstitution s'accorderait « de par des raisons morphologiques et fonctionnelles, étant donné le *torus angularis* accusé, mieux à un occiput anguleusement courbé avec le *planum* occipital plus bas, l'angle lambda plus grand et le *planum nuchae* plat – et non à un occiput du type de celui de Swanscombe ». Il a donc remplacé l'os occipital par celui de l'individu trouvé à Bilzingsleben (Allemagne), plus fragmentaire que Vertesszöllös.

II.1.3.2 Particularités des précédentes reconstitutions

Les différentes reconstitutions du crâne Arago 21-47 réalisées présentent des particularités discutables :

- Les os temporaux utilisés correspondent à des moulages de ceux de Sangiran 17 (*Homo erectus*) alors qu'Arago 21-47 est un Anténéandertalien (*Homo heidelbergensis*). Cette utilisation de fragments d'une espèce potentiellement éloignée
- Les pariétaux de Swanscombe sont plus graciles qu'Arago 47 qui présente des lignes temporales marquées et un fort torus angularis.
- Le palais d'Arago 21, bien que restauré, est toujours déformé avec une divergence des arcades dentaires droite et gauche.
- Le frontal d'Arago 21 est très étroit postérieurement (faible divergence de l'écaille frontale cérébrale), avec des arêtes frontales temporales presque parallèles.
- Les cavités orbitaires droite et gauche présentent un contour différent (plus rectangulaire à droite).
- L'articulation des pariétaux (droit et symétrique) a généré un faible angle astérion–lambda–astérion (73° ; E. SPITERY, 1982, 1984) mais aussi une angulation postérieure de la voûte bipariétale (GRIMAUD, 1982b ; figure 3). Cette angulation de la voûte correspond à une voûte bipariétale insuffisamment élargie au niveau de la largeur biastérique.

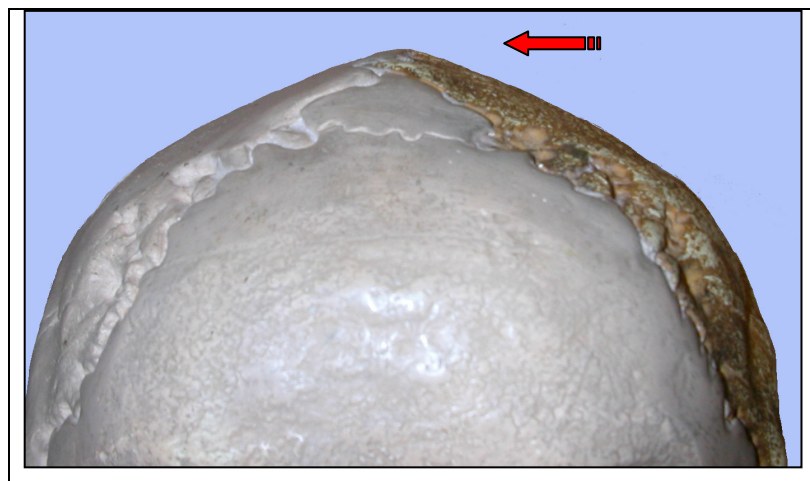


Figure 3 : Angulation postérieure de la voûte bipariétale sur la reconstitution Arago – Swanscombe 1981.

Le problème de largeur se répercute au niveau de la suture sagittale, convexe vers la droite en vue supérieure par rapport à la corde lambda – bregma (figure 4). Sans cette angulation de la voûte bipariétale, nous aurions pu considérer cette convexité comme une marque de dissymétrie du crâne original. Mais la combinaison de ces deux caractères (angulation et convexité) correspond à une largeur biastérique trop faible. Il y a donc nécessité d'élargir la voûte bipariétale (GRIMAUD, 1982b ; E. SPITERY, 1982, 1984).

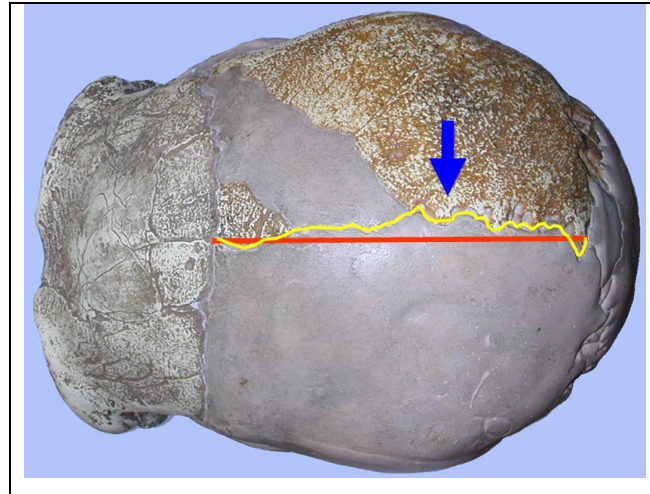


Figure 4 : Convexité vers la droite de la suture sagittale de la reconstitution Arago – Swanscombe 1981.

II.2 Les Hominidés fossiles découverts à Biache-Saint-Vaast

-Biache-Saint-Vaast 1 : Le 5 mai 1976, au cours d'une fouille de sauvetage sur le site paléolithique de Biache-Saint-Vaast sous la direction de A. Tuffreau (1988), à l'est d'Arras et au sud de Lille, Nord-Pas-de-Calais, France (figure 5), une moitié postérieure de neurocrâne d'individu adulte a été découverte ainsi que des fragments inférieurs de la face. Seulement une portion fragmentaire du maxillaire et 11 dents sont dénombrées. Tous les autres os de la face sont absents, tout comme la mandibule. Le neurocrâne est lui aussi incomplet. L'os frontal ainsi que le sphénoïde n'ont pas été retrouvés. Il ne subsiste de la partie postérieure que deux os pariétaux incomplets, deux os temporaux fragmentaires et l'os occipital presque complet. Ce fossile présente des déformations au niveau de l'os pariétal gauche et de l'occipital. Lors de l'assemblage des fragments (près de 80), les sutures sagittale et lambdoïdes sont apparues complètes (VANDERMEERSCH, 1978).

Selon Vandermeersch (1982), la M₃ achevait sa croissance. De plus, en étudiant l'ouverture des sutures, il a situé cet individu à la limite entre l'adolescence et l'âge adulte.

L'individu est attribué au sexe féminin du fait de la minceur des parois et du faible développement des reliefs. Selon H. Rougier (2003), l'individu pourrait avoir été âgé de moins de 15 ans et ceci expliquerait la gracilité des caractères énoncés.

Ce crâne présente un ensemble de caractères anatomiques de type néandertalien : petite apophyse mastoïde, un contour frontal du crâne ovalaire s'approchant de la forme en bombe des Néandertaliens, des structures anatomiques peu marquées ou absentes telles que le torus angularis, et surtout un chignon occipital. Ces données laissent supposer qu'il s'agit d'un *Homo neanderthalensis*. Les restes sont datés entre -200 000 et -150 000 ans (SOMME, 1988).



Figure 5: Situation géographique du site Biache-Saint-Vaast.

-Biache-Saint-Vaast 2 : L'étude des restes fauniques découverts dans ce site a permis, le 8 novembre 1986, l'identification de fragments d'un autre spécimen, Biache-Saint-Vaast 2 (AUGUSTE, 1990). Il ne subsiste de cet individu que des fragments de l'os frontal (torus sus-orbitaire et base de l'écaille frontale cérébrale), de l'os pariétal et du temporal gauche, une des grandes ailes du sphénoïde et la portion antérieure de l'os occipital.

Les ossements, conservés au CERP, Tautavel, seront décrits plus loin plus précisément.

Afin de pouvoir réaliser puis comparer nos reconstitutions, nous avons étudié une série de crânes d'Hominidés fossiles et actuels. Parmi ceux-ci, nous avons utilisé une série de restes crâniens originaux d'Hominidés fossiles (tableaux 1a et 1b).

II.3 Population étudiée

II.3.1 Hominidés fossiles originaux

Tableau 1a : Liste des Hominidés fossiles originaux étudiés.

Fossile	Site	Pays	Datation
Arago 3A	Caune de l'Arago, Tautavel, Pyrénées Orientales	France	-0,45 Ma
Arago 4			
Arago 13			
Arago 21			
Arago 47 & 47a			
Arago 78			
Arago 79			
Biache-Saint-Vaast 2	Biache-Saint-Vaast, Pas de Calais		-0,2 à -0,15 Ma

Tableau 1b : Liste des Hominidés fossiles originaux étudiés à partir de scanners à rayonnement X.

Bodo 1	Moyenne Vallée de l'Awash	Ethiopie	-0,74 et -0,55 Ma
D2280	Dmanissi	Géorgie	-1,81 Ma
D2282			
OH9	Korongo	Tanzanie	-1,2 à -1,15 Ma
Sts 5	Sterkfontein	Afrique du Sud	-2,8 à -1,5 Ma
Sts 71			

Hominidés du Pléistocène inférieur :

-OH 9 : Cette *calvaria* incomplète (figure 6) a été découverte par Louis Leakey au-dessus du Membre I, dans le Membre II du site Korongo, Gorges d'Olduvai, Tanzanie, en 1960 (LEAKEY, 1961 ; LEAKEY, 1971). Les datations la situent entre -1,2 et -1,15 Ma (LEAKEY *et al.*, 1982). La voûte bipariétale est incomplète avec destruction quasi-complète du pariétal droit ainsi que la partie sagittale de l'écaille du pariétal gauche. La face n'a pas été préservée en dessous du nasion. L'original est conservé à Dar-es-Salaam, au National Museum of Tanzania. Nous avons utilisé les données numériques du CD ROM OH9 de la collection

« Digital Archives FOSSIL HOMINOIDS » de l'Institut d'Anthropologie de l'Université de Vienne (WEBER *et al.*, 2003) ainsi que celles issues d'une numérisation par tomодensitométrie d'un moulage du crâne.

Homo erectus africain adulte pour Rightmire (1979), Weber *et al.* le considèrent comme *Homo ergaster/erectus* (2000). Nous l'étudierons avec les *Homo ergaster*.

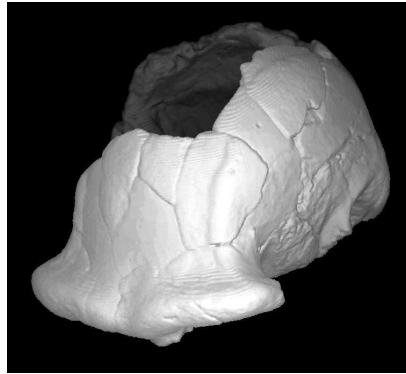


Figure 6 : Reconstruction tridimensionnelle de la calotte crânienne de OH 9.

-D2280 : Ce spécimen d'*Homo georgicus* (GABUNIA *et al.*, 2002 ; figure 7), découvert à Dmanissi, Géorgie, en septembre 1999 consiste en un neurocrâne presque complet et relativement bien préservé (GABUNIA *et al.*, 2000). Le fossile (individu masculin adulte) présente une série de fractures sur le bord postérieur droit dans la région de l'astérion (sur le pariétal, l'occipital et le temporal). Le torus sus-orbitaire, continu sans dépression glabellaire, précède une forte constriction post-orbitaire. La datation de la couche de cendres volcaniques dans laquelle les restes humains ont été découverts a été faite au moyen de la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et a donné une valeur de -1,81 Ma (LUMLEY *et al.*, 2002).

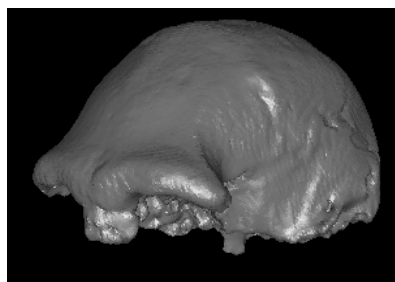


Figure 7 : Reconstruction tridimensionnelle de la calotte crânienne de D2280.

-D2282 : Cet individu (une adolescente) a été découvert à Dmanissi dans les mêmes conditions que D2280 (GABUNIA *et al.*, 2000) et est daté de la même période (LUMLEY *et al.*, 2002). Cet *Homo georgicus* (figure 8) est déformé avec en vue frontale un décalage des os

malaires par rapport à l'os frontal, une avancée du temporal droit et un enfoncement de la partie antérieure droite de l'occipital. La calotte crânienne paraît plus gracile que celle de D2280.



Figure 8 : Reconstruction tridimensionnelle du crâne de D2282.

Hominidé du Pléistocène moyen :

-Bodo 1 : Les restes crâniens (face fragmentaire et bord antérieur des pariétaux et temporaux ; figure 9) de ce spécimen ont été découverts dans la Moyenne Vallée de l'Awash, Ethiopie, par la « Rift Valley Research Mission in Ethiopia » menée par J. Kalb (CONROY *et al.*, 1978). Une analyse virtuelle a été réalisée pour déterminer le volume endocrânien (CONROY *et al.*, 2000b). Les datations ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, comparaison faunique) situent le fossile entre -0,74 et -0,55 Ma (CLARK *et al.*, 1984, 1994). Nous avons utilisé les données numériques du CD ROM Bodo 1 de la collection « CD ROM Edition FOSSIL HOMINIDS » de l'Institut d'Anthropologie de l'Université de Vienne (WEBER *et al.*, 2000) ainsi que celles issues d'une numérisation par tomодensitométrie d'un moulage du crâne.

Rightmire en 1996 attribue ce fossile à l'espèce *Homo heidelbergensis*.



Figure 9 : Reconstruction tridimensionnelle du crâne de Bodo 1.

II.3.2 Hominidés fossiles étudiés à partir de moulages

En absence des crânes originaux, nous avons utilisé des moulages afin d'obtenir des données comparables. L'inconvénient de l'absence de l'endocrâne est compensé par un travail d'analyse exocrânien.

Hominidés du Pléistocène inférieur d'Afrique :

-KNM-ER 1470 : Restes fragmentaires d'un crâne d'individu adulte, découverts en août 1972 par Bernard Ngeneo dans l'aire 131 de Koobi Fora, Kenya, et datés de -1,9 à -1,88 Ma (WOOD, 1991). Le prognathisme du massif facial peut être remis en cause suivant l'angle donné au maxillaire par rapport au neurocrâne dans les reconstitutions. Ce crâne, a d'abord été attribué au genre *Homo* (LEAKEY, 1973). L'attribution phylétique est discutée, entre *Homo habilis* (HOWELL, 1978) et *Homo rudolfensis* (GROVES, 1989). La création de l'espèce *Kenyanthropus platyops* (LEAKEY *et al.*, 2001) soulève même l'idée d'en faire *Kenyanthropus rudolfensis* (LIEBERMAN, 2001).

-KNM-ER 1813 : Ce crâne de faible capacité crânienne, âgé de 1,9 à -1,88 Ma (FEIBEL *et al.*, 1989 ; WOOD, 1991), a été découvert en 1973 par Kamoya Kimeu à Koobi Fora, Kenya (LEAKEY, 1974). Il a d'abord été attribué au genre *Australopithecus* (LEAKEY, 1974) puis a été décrit comme le paratype des *Homo ergaster* (GROVES, 1989) et attribué par Wood (1991) à *Homo habilis*.

-OH 7 : Les restes de cet individu juvénile (mandibule, fragments crâniens dont un pariétal droit, restes post-crâniens) datés de -1,75 Ma ont été découverts en novembre 1960 par J. H. E. Leakey dans les Gorges d'Olduvai, Tanzanie. Cet individu est l'holotype des *Homo habilis* (LEAKEY *et al.*, 1964).

-KNM-ER 3733 : Crâne d'individu adulte découvert en 1975 par Bernard Ngeneo dans l'aire 104 de Koobi Fora au Kenya. Daté de -1,75 Million d'années (Tuf KBS sus-jacent ; WOOD, 1991), ce crâne présente un certain nombre d'altérations dont un enfoncement de la table externe au niveau du bregma. Les lignes temporales sont très marquées. Attribué à l'espèce *Homo erectus* (LEAKEY, 1976), Howell (1978) et Rightmire (1979) le considèrent comme un *Homo erectus*. Il est depuis rapproché des *Homo ergaster* (GROVES, 1989 ; WOOD, 1992a, 1992b).

-KNM-ER 3883 : Spécimen découvert en 1976 à Koobi Fora, Kenya par Richard Leakey dans l'aire 1/1A d'Ileret, « Okote Member » de la « Koobi Fora Formation ». Cette position stratigraphique implique un âge entre -1,5 et -1,65 Ma (WOOD, 1991). Le fossile consiste en un neurocrâne, la cavité orbitaire droite et les fragments supérieurs droit du maxillaire et du malaire droit. Wood (1992a) le considère comme un *Homo ergaster*.

-KNM-WT 15000 : Adolescent masculin quasi-complet découvert en août 1984 à l'ouest du lac Turkana, au sud de Nariokotome, Kenya, par Kamoya Kimeu (BROWN, 1985 *et al.*; WALKER *et al.*, 1993). Cet individu a été daté de -1,6 Ma (BROWN *et al.*, 1985). Le crâne, qui présente un fort prognathisme alvéolaire a été reconstitué à partir des fragments retrouvés. Les lacunes ont été comblées lors de la reconstruction à l'exception de la jonction fronto-nasale et du bourrelet sus-orbitaire (WALKER *et al.*, 1993). Le fossile a été attribué phylétiquement à l'espèce *Homo erectus* (BROWN *et al.*, 1985) puis à l'espèce *Homo ergaster* (WOOD, 1992a, 1992b).

Hominidés du Pléistocène inférieur d'Europe :

-Ceprano 1 : Calvaria d'hominidé découverte le 13 mars 1994 à Ceprano, Latium, Italie par I. Biddittu (ASCENZI *et al.*, 1996). Le niveau d'argile dans lequel le spécimen a été découvert est recouvert d'un niveau de sables volcaniques datés de -0,7 Ma (K-Ar). Bruner et Manzi (2005) estiment que le fossile date de -800 000 à -900 000 ans. Il ferait partie du Pléistocène inférieur final (ASCENZI *et al.*, 1996).

La calotte crânienne présente une voûte basse, large (largeur maximale à proximité des torus angularis) et courte. Postérieurement l'opisthocranion coïncide avec l'inion. En vue supérieure la calotte présente un contour birsoïde. L'os frontal est bas, fuyant, relativement large, avec un torus continu et une légère dépression sagittale médiane. Les sinus frontaux sont déjà présents (BRUNER *et al.*, 2005). Le sillon supratotal est continu. Les arêtes frontales sont parallèles au niveau de l'os frontal débutant au niveau d'une constriction post-orbitaire peu marquée. La ligne temporale supérieure est bien marquée et prolonge, avec la ligne inférieure, un torus angularis massif. La voûte bipariétale est fragmentaire et présente des déformations. Le coté gauche de la calvaria semble être le plus abîmé. Certaines portions de la calvaria sont bien conservées : les arcades orbitaires frontales, et la zone occipitale, où les fragments peuvent être positionnés de manière continue. L'os occipital est fracturé, mais ne semble pas déformé. Il est cependant incomplet au niveau de la portion basilaire. Les os temporaux sont fragmentaires. Le droit présente la base du processus zygomatique, mais son

écaille est incomplète, tandis que celui de gauche possède son écaille mais pas le processus zygomatique.

Nous avons utilisé un moulage de la reconstruction de F. Mallegni (ASCENZI *et al.*, 2000) et non celle réalisée par R. Clarke (2000). L'original est conservé à l'Institut de Paléontologie Humaine, Rome, Italie.

Ceprano 1 est l'unique représentant de l'espèce *Homo cepranensis* (MALLEGNI *et al.*, 2003) après avoir été considéré comme représentant d'*Homo antecessor* (MANZI *et al.*, 2001b). L'espèce n'est pas reconnue par Cameron *et al.* (2004).

Hominidés du Pléistocène moyen et supérieur d'Asie :

-Dali : Ce crâne a été découvert dans une des terrasses de la rivière Luo, dans la province de Shaanxi, Chine. Il se situe à la base des niveaux du Pléistocène moyen récent (LI, 1983). Le fossile serait daté entre -250 000 et -350 000 ans (WANG, 1985 ; YIN *et al.*, 2001). Son attribution phylétique est discutée, entre *Homo sapiens* archaïque (WU, 1981) et forme transitionnelle entre les *Homo erectus* et les *Homo sapiens* (WU, 1983). L'étude de l'os frontal par Spitz (1984) souligne les caractères d'*Homo erectus* de celui-ci.

-Hexian : Des fouilles entreprises en 1980-1981 ont mis au jour différents restes humains dans la province d'Anhui, Chine. La calvaria fragmentaire (PA 830) correspondrait à un jeune adulte de sexe masculin. Les premières mesures sur des séries Uranium (CHEN *et al.*, 1987) ont donné un âge entre -150 000 et -190 000 ans (avec un maximum possible de -270 000 ans). D'autres mesures (ESR et Séries U ; GRÜN *et al.*, 1998) sur des dents animales du site ont donné un âge de -412 000 ans (+/- 25 000). Le fossile a été décrit comme *Homo erectus* (WU *et al.*, 1982).

-Narmada : Hémi-calvaria découverte dans le site de Hathnora, moyenne vallée de la Narmada, Inde. Selon Cameron *et al.* (2004b), ce fossile aurait des affinités européennes et non asiatiques. Une datation fondée sur des restes de bovidés associés au spécimen (spectrométrie gamma sur les séries Uranium), donne un âge minimum de -236 000 ans (CAMERON *et al.*, 2004b). Ce fossile a été phylétiquement attribué aux *Homo erectus* (LUMLEY *et al.*, 1985b).

-Ngandong 5 (Solo IV : calva); Ngandong 6 (Solo V : calvaria incomplète); Ngandong 7 (Solo VI : calvaria plus complète d'une jeune femme).

-Ngandong 9 (Solo VIII) : Il ne subsiste de cet individu adulte que les deux os pariétaux. Il a été découvert dans la même région que les autres Ngandong. Tous ces individus ont été mis au jour entre 1931 et 1933 par C. ter Haar, W. F. F. Oppenoorth et G. H. R. von Koenigswald et décrits comme *Homo erectus*. Ces individus proviennent des sédiments des terrasses dominant la berge de la rivière Solo, à 10 km au nord de Ngawi, à l'Est de Java, Indonésie. La datation des individus de ce site est difficile. Certaines datations fondées sur la faune donnent un âge compris entre -80 et -100 000 ans (BARTSTRA *et al.*, 1988). Swisher *et al.* (1996) donnent une datation plus récente de -25 000 ans (résonance électronique de spin sur des dents de bovidés de niveaux à hominidés). La découverte des spécimens de Flores (BROWN *et al.*, 2004) et surtout leur datation (-18 000 ans ; MORWOOD *et al.*, 2004) pourrait accréditer une telle date.

-Ngawi 1 : Calvaria quasi complète et en bon état découverte en août 1987 sur la rive gauche de la rivière Solo près de Selopuro, Java, Indonésie. H. Widiyanto et V. Zeitoun (2003) l'attribuent à un jeune individu, vraisemblablement féminin âgé, de moins de 100 000 ans. Le torus supra-orbitaire est fort, linéaire en vue supérieure. L'individu présente une légère carène sagittale avec un épaississement bregmatique peu proéminent. Le crâne est sphénoïde avec une dépression post-orbitaire, un arrière de crâne curviligne avec une dépression au niveau de l'astérion. Le crâne a une forme pentagonale à tendance courbée en vue postérieure. Il s'agit d'un *Homo erectus* (*Homo soloensis*) (WIDIANTO *et al.*, 2003).

-Sambungmacan 1 : Calotte crânienne d'individu adulte, mise au jour en 1973 sur les bords de la rivière Solo, près du village Ngadirojo, secteur de Sambungmacan, Java, Indonésie. Les premières datations la situaient entre le début et le milieu du Pléistocène (OAKLEY *et al.*, 1975). Le fossile est attribué à *Homo erectus* (JACOB, 1975).

-Sambungmacan 3 : Calvaria partielle attribuée à un individu féminin adulte (MARQUEZ *et al.*, 2001) et qui serait datée de -50 000 ans (ANTON *et al.*, 2002). Le fossile a été découvert sur la rive de la rivière Solo, village Poloyo, Sambungmacan, Java, Indonésie. Le crâne est de petite taille, avec un torus supra-orbitaire gracieux. L'écaille occipitale est verticale et l'angulation avec le plan nuchal semble forte par rapport à celle des autres spécimens asiatiques. Le pariétal ne présente pas de torus angularis. Le fossile est attribué à *Homo erectus* (MARQUEZ *et al.*, 2001)

-Sangiran 2 (Skull II) : Calotte crânienne d'*Homo erectus* adulte féminin, découverte en 1937 par G. H. R. von Koenigswald sur la berge de la rivière Tjemoro, aux environs de Bapang, Java, Indonésie (OAKLEY *et al.*, 1975). Elle proviendrait du niveau de Kabuh, soit un âge compris entre -0,73 Ma et -0,93 Ma (SEMAH *et al.*, 1981-1982 ; SARTONO, 1982 ; HYODO *et al.*, 1993).

-Sangiran 3 (Skull III) : Restes crâniens d'un *Homo erectus* juvénile, découverts en 1937 par G. H. R. von Koenigswald sur la berge de la rivière Tjemoro, aux environs de Bapang, Java, Indonésie (OAKLEY *et al.*, 1975). Ce spécimen a été découvert dans les niveaux de Kabuh, soit un âge compris entre -0,73 Ma et -0,93 Ma (SEMAH *et al.*, 1981-1982 ; SARTONO, 1982 ; HYODO *et al.*, 1993).

-Sangiran 10 : Fragment de la calotte crânienne limité à la voûte bipariétale, découvert en 1963 par T. Jacob à proximité de la rivière Tjemoro, Java, Indonésie, dans le même niveau stratigraphique que Sangiran 2. Ce fossile est considéré comme un *Homo erectus* archaïque par Sartono (1982) et Grimaud et Jacob (1983).

-Sangiran 17 : Crâne fragmentaire et reconstitué d'*Homo erectus* découvert en septembre 1969 par Towikromo sur le site de Sangiran, dans l'île indonésienne de Java. Cet individu masculin constitue l'un des rares restes de Pithécantropes possédant encore un massif facial (SARTONO, 1971). Ce spécimen a été découvert dans les niveaux de Kabuh, soit un âge compris entre -0,73 Ma et -0,93 Ma (SEMAH *et al.*, 1981-1982 ; SARTONO, 1982 ; HYODO *et al.*, 1993).

-Sangiran 38 : Calotte crânienne incomplète d'*Homo erectus* provenant des niveaux de la formation de Kabuh (âge compris entre -0,73 Ma et -0,93 Ma ; SEMAH *et al.*, 1981-1982 ; SARTONO, 1982 ; HYODO *et al.*, 1993) sur le site de Sangiran, découverte par T. Jacob. Il ne subsiste de l'os frontal que l'écaille frontale cérébrale. Les pariétaux sont incomplets. Il s'agirait d'un individu adulte, peut-être masculin (WIDIANTO, 1993).

-Trinil 2 (Skull I) : Calotte crânienne d'un individu féminin adulte, découverte par E. Dubois en octobre 1891, constituant l'holotype de *Pithecanthropus erectus* Dubois, 1894. Selon Sartono (1982) le spécimen proviendrait de dépôts plus jeunes que -0,73 Ma.

-Zhoukoudian III (Ckn E 1.PA.16, Skull III) : Crâne d'adolescent masculin découvert en décembre 1929 par W. C. Pei sur le site de Zhoukoudian (anciennement Choukoutien), Chine, dans le locus E (OAKLEY *et al.*, 1975). La face n'a pas été conservée. Selon la méthode des traces de fission (LIU, 1983) et selon R. Wu et X. Dong (1983), ce serait le plus vieux spécimen humain de la grotte avec un âge de -460 000 ans BP. Le crâne est attribué phylétiquement aux *Homo erectus*.

-Zhoukoudian XI (Ckn L 2.PA.99, Skull XI) : Il s'agit des restes incomplets du crâne d'une femme adulte. La découverte a eu lieu en novembre 1936 par L. P. Chia dans le locus L de la grotte de Zhoukoudian, Chine. Le niveau dans lequel reposaient ces restes a été daté en 1983 par Z. C. Liu de -420 000 ans. La calotte crânienne est la plus complète parmi celles retrouvées dans ce site. L'os frontal, les os temporaux et pariétaux ainsi que l'os occipital sont relativement bien préservés. Les restes ont été attribués aux *Homo erectus*.

-Zhoukoudian XII (Ckn L 3.PA.100, Skull XII) : Calotte crânienne d'individu adulte de sexe masculin, découverte en novembre 1936 par L. P. Chia dans le locus L du site de Zhoukoudian, Chine (OAKLEY *et al.*, 1975). Selon la méthode Ur-Th (LIU, 1983), elle daterait de -420 000 ans BP. Cette calotte crânienne est attribuée à *Homo erectus*.

Hominidés du Pléistocène moyen d'Europe :

-Petalona 1 : Crâne d'individu masculin, découvert en septembre 1960 par une équipe grecque à Petralona, Grèce. La datation de ce reste humain est difficile. Chamla (1981-1982), Hennig *et al.* (1981) et Grün (1996) ont proposé des valeurs comprises entre -160 000 et -240 000 ans tandis que Bonis *et al.* en 1991 a estimé l'âge supérieur à -350 000 ans. Son anatomie générale (front fuyant, forme des maxillaires, présence d'un chignon occipital) est source de discussions pour l'attribution phylétique de cet individu, le fossile étant soit l'un des premiers néandertaliens (KOKKOROS *et al.*, 1960) soit un *Homo heidelbergensis* - *Homo erectus* (STRINGER *et al.*, 1979, 1983).

-Sima de los Huesos 5 : Crâne d'individu masculin adulte découvert dans le site de la Sima de los Huesos, dans la Sierra de Atapuerca, Espagne, en juillet 1993 par Juan-Luis Arsuaga *et al.* (1993, 1997a). Le site est daté entre -200 000 et -320 000 ans (BISCHOFF *et al.*, 1997). Quasi complet, le réassemblage présente cependant une lacune au niveau de la partie coronale

du pariétal gauche ainsi qu'une fracture du contour externe de l'orbite droite. Le crâne a été attribué phylétiquement aux *Homo heidelbergensis* (ARSUAGA *et al.*, 1997b).

-Swanscombe : Portion postérieure d'une calotte crânienne, il ne subsiste de ce crâne que l'occipital et les deux pariétaux. Les os connus sont d'ailleurs assez exceptionnels car ils ont été découverts isolément en 1935, 1936 et 1955 sur le site de Swanscombe, Angleterre. Cette calotte crânienne d'un individu féminin a été attribuée aux *Homo heidelbergensis* avec un âge estimé de -400 000 ans (STRINGER *et al.*, 1999).

Les Hominidés du Pléistocène moyen d'Afrique :

-Kabwe (Broken Hill 1) : Calvarium découvert en juin 1921 par Tom Zwigelaar dans l'ancienne Zambie, à Kabwe. Ce crâne, incomplet pose un problème au niveau de la datation. Suivant les auteurs, il est attribué au stade isotopique 9 (VRBA, 1982) ou au 6 (PARTRIDGE, 1982) c'est à dire entre -300 000 et -200 000 ans. Son attribution phylétique est source de discussions : *Homo sapiens rhodesiensis* pour certains (WOODWARD, 1921), *Homo sapiens* archaïque pour d'autres (RIGHTMIRE, 1986), *Homo heidelbergensis* pour les derniers (RIGHTMIRE, 1990).

-Elandsfontein (Saldanha 1) : Calotte crânienne découverte en surface d'une dune de sable du site de Saldanha, en Afrique du Sud en 1953 par Jolly et Singer. Selon Vrba (1982) le crâne aurait un âge compris entre -600 000 et -300 000 ans (après étude de la faune).

-Sale 1 : Cet *Homo heidelbergensis* (une jeune femme ; KALVIN *et al.*, 1995), découvert au Maroc, est daté de -420 000 ans après réalisation d'une étude par Résonance Electromagnétique de Spin sur l'émail d'une dent (HUBLIN, 1991).

-Ternifine 4 (Tighenif) : Pariétal droit d'un jeune *Homo heidelbergensis* adulte découvert en 1955 par C. Arambourg et R. Hoffstetter (1955) en Algérie et daté de -700 000 ans (GERAADS *et al.*, 1986).

Les Hominidés du Pléistocène supérieur d'Europe et du Moyen-Orient :

-Amud 1 : Crâne d'un individu masculin adulte, découvert en juin 1961 par Hisashi Suzuki dans la grotte d'Amud, Israël. Les datations du niveau de la sépulture par E.S.R. la situent entre -54 000 et -38 000 ans (GRÜN, 1991). Le crâne qui présentait un certain nombre de

fractures a en partie été restauré et attribué à l'espèce *Homo neanderthalensis* (SUZUKI, 1970).

-Chancelade 1 : Crâne d'*Homo sapiens* masculin adulte (35 – 40 ans), découvert en octobre 1888 par M. Hardy à proximité de Périgueux, Dordogne, France. Ce reste a été daté du Paléolithique supérieur, avec un stade culturel Magdalénien (PIVETEAU, 1957).

-La Chapelle-aux-Saints : Individu néandertalien masculin adulte découvert en août 1908 par les frères Bouyssonie et Jossef Bonneval, dans la grotte de la Vache Bonneval au lieu dit La Chapelle-aux-Saints, France. Le crâne, d'un individu relativement âgé (dents déchaussées et résorption de l'os), fracturé au niveau du pariétal gauche, a été décrit par Marcellin Boule en 1908. Différentes reconstitutions crâniennes ont été réalisées, notamment celle proposée par Jean Louis Heim (1990) que nous avons utilisée. L'individu aurait été enterré entre - 60 000 et -44 000 ans (datation ESR ; MELLARS, 1986 ; RAYNAL, 1990 ; STRINGER *et al.*, 1991)

-Cova Negra : Pariétal droit découvert en juillet 1933 par Gonzalo Viñes dans la grotte de Cova Negra, Jativa, Espagne. D'après l'état d'oblitération des sutures, il s'agirait d'un individu âgé (environ 50 ans ; LUMLEY, 1973) de sexe masculin. L'os est quasiment complet, mais une grande partie de la région lambdatique (postéro-supérieure) ainsi que les extrémités des angles bregmatique (antéro-supérieur) et ptérique (antéro-inférieur) ont été altérés après fossilisation. Nous avons utilisé une reconstitution présentant une estimation des angles détruits. Le fossile est daté du Würm I (JORDA CERDA, 1946 ; MADE, 2001). L'attribution phylétique de cet individu est incertaine, entre *Homo neanderthalensis* (FUSTE, 1958) et *Homo heidelbergensis* (LUMLEY, 1973).

-Cro-Magnon 1 : Crâne d'adulte masculin découvert en mars 1868 par Louis Lartet dans l'Abri Cro-magnon, Les Eyzies, France (JONES, 1868). Le crâne dolichocéphale correspond à un individu relativement âgé (dents déchaussées, synostose complète de certaines sutures). Ce crâne, ainsi que celui des individus Cro-Magnon 2 et 3, est daté de $-27\,680 \pm 270$ ans BP (carbone 14 en SMA ; HENRY-GAMBIER, 2002).

-Cro-Magnon 2 : Calvaria d'adulte d'*Homo sapiens* féminin découvert en mars 1868 par Louis Lartet dans l'Abri Cro-magnon, Les Eyzies, France.

-Cro-Magnon 3 : Calotte crânienne d'*Homo sapiens* adulte masculin découvert en 1868 par Louis Lartès dans l'Abri Cro-magnon, Les Eyzies, France.

-La Ferrassie 1 : D. Peyrony et L. Capitan ont découvert en septembre 1909 dans le grand Abri de La Ferrassie en France les restes de différents individus néandertaliens (CAPITAN, 1909 ; HEIM, 1976). Le premier individu correspond à un adulte dont le crâne, bien que morcelé, est complet. Les outils côtoyant les restes ont été datés par thermoluminescence à - 72 000 ans par Mellars (1986).

-Gibraltar 1 (Forbes' Quarry) : Découvert à Gibraltar en mars 1848 par le lieutenant R. A. Flint, ce fossile correspond au crâne fragmentaire d'une néandertalienne adulte (PIVETEAU, 1957; TATTERSALL, 1988). Il ne subsiste que la face et le flanc droit du crâne (pariétal incomplet, temporal, occipital, sphénoïde). Des travaux de reconstitutions virtuelles ont été réalisés (ZOLLIKOFER, 1998).

-Hotu Cave 2 : Crâne d'*Homo sapiens* adulte féminin découvert près de Behshahr en Iran en 1951 par C. S. Coon (1952), d'âge estimé entre 25 et 30 ans. Elle est datée de la fin du Pléistocène – début de l'Holocène.

-Jebel Irhoud 1 : Découvert dans une mine à l'ouest du Maroc, il ne reste de ce fossile d'*Homo sapiens* qu'un crâne fracturé et fragmentaire. Selon Hublin (1991), il serait contemporain du stade 6.

-Krapina 3 (Cranium C) : *Homo neanderthalensis* découvert en août 1899, par Karl Gorjanovic-Kramberger (1906) dans la cavité de Krapina en Croatie. Les datations ESR et des séries Uranium, donnent un âge compris entre -100 000 et -160 000 ans (RINK, 1995). Il ne subsiste de cet individu qu'une portion du crâne correspondant aux parois orbitaires, la voûte de la cavité nasale, la base de l'écaille cérébrale du frontal et un fragment de l'écaille droite, le temporal droit ainsi que l'écaille pariétale inférieure correspondant. Le crâne a été déterminé comme celui d'un adulte de sexe féminin.

-LH18 : Cette calvaria a été découverte sur le site de Laetoli en 1976. Cet *Homo sapiens* a été daté entre -90 000 et -129 000 ans (BRAÜER, 1990).

-Markina Gora (Kostenki) : Crâne de jeune *Homo sapiens* masculin (20-25 ans) découvert en 1954 par A. N. Rogachev. Le lieu de découverte fait partie d'un groupe de sites (Kostenki) localisés en Russie. Le niveau est daté de près de -15 000 ans BP, et a livré de l'outillage du Paléolithique supérieur (TATTERSAL, 1988).

-Mladec V : Calotte crânienne attribuée à un *Homo sapiens* masculin adulte, découverte en mars 1904 en Moravie, ancienne République Tchécoslovaque. Ces restes ont été attribués au stade culturel Aurignacien (TATTERSAL, 1988).

-Monte Circeo I (Guattari) : Découvert en février 1939 par A. Guattari dans la grotte Guattari en Italie, ce crâne néandertalien présente une déformation de la cavité orbitaire droite ainsi que de la zone correspondant au foramen magnum. Les datations par E.S.R. sur la calcite et la faune donnent un âge minimum compris entre -60 000 et -50 000 ans (GRÜN, 1991) pour cet homme adulte.

-Neanderthal 1 : En août 1856, une calotte crânienne d'homme adulte a été découverte dans la grotte de Feldhofer, à Neandertal, Allemagne. Von Fuhlrott a reconnu en elle les restes d'un être différent de notre espèce. Les fouilles de 1997 et 2000 ont permis la mise au jour de nouveaux fragments. Certains ont pu être attribués à cet individu et il est apparu qu'il y avait les restes d'au moins un autre individu reposant dans cette cavité. Ces fossiles ont été datés de -40 000 ans au moyen des radiocarbones (SCHMITZ, 2002). En raison des problèmes d'orthographe (réforme allemande) nous parlerons soit de l'Homme de Neandertal soit de Neanderthal 1.

-Obercassel 2 (Oberkassel) : Crâne de jeune femme *Homo sapiens* découvert en février 1914 par R. Bonnet (1914). Il s'agit d'un individu jeune (20-25 ans). Le niveau de dépôt correspondrait culturellement au Magdalénien.

-Pataud (Crâne de l'Abri Pataud) : Il s'agit d'un crâne d'*Homo sapiens* féminin découvert en 1958 durant les fouilles de l'Abri Pataud, Les Eyzies, Dordogne, France. Ce crâne d'*Homo sapiens* présente une forme très allongée, à la limite de la mésocrânie (BILLY, 1975). Le fait que les troisièmes molaires soient en cours d'éruption, ainsi que l'état des sutures (notamment sphéno-occipitale) ont amené les découvreurs à en faire un individu jeune, d'âge compris entre 16 et 18 ans. Le fossile date selon Movius (1975) de 21 940 +/- 250 ans BP.

-Predmost III (Předmostí 3) : Crâne attribué à un *Homo sapiens* de 35-40 ans de sexe masculin, découvert en juin 1894 par K. J. Maška dans l'ancienne république de Tchécoslovaquie sur un site d'occupation daté de -26 000 ans BP (radiocarbone) avec près de 30 autres individus (TATTERSAL, 1988).

-Qafzeh 9 : Crâne fragmentaire d'une femme *Homo sapiens* adulte découvert en 1969 à Qafzeh, Israël (VANDERMEERSCH, 1969). De nombreuses lacunes ont été comblées lors de la reconstitution. Le fossile est daté entre -100 000 et -90 000 ans (VALLADAS, 1991 ; YOKOYAMA, 1997).

-La Quina H5 : Crâne d'un néandertalien adulte découvert en septembre 1911 par H. Martin en Charente dans l'Abri sous roche de La Quina, France. Mellars (1986) indique une date de -65 000 ans par la thermoluminescence pour les silex voisins des restes. Il s'agirait d'une femme. Il ne subsiste de la face que les malaires et un frontal abîmé au niveau de la zone nasale. Le pariétal gauche est aussi cassé. Le sphénoïde est également manquant.

-Saccopastore 1 : Il s'agit d'un crâne d'*Homo neanderthalensis* adulte féminin découvert en mai 1929 par S. Sergi dans les environs de Rome, Italie, et quasiment complet à l'exception des arcades zygomatiques et du torus orbitaire cassé. Une perforation sur le pariétal droit est aussi notable. Les estimations de datation situent ce reste entre -150 000 et -80 000 ans BP (MANZI, 1991 ; CONDEMI, 1992).

-Skhul V : Crâne quasi complet d'un *Homo sapiens* masculin adulte (VANDERMEERSCH, 1981), découvert en mai 1932 par Theodore McCown (1939) et Hallam Movus Jr. dans le site de Mughareh-es-Skhul, Mont Carmel, Israël. Les datations donnent une moyenne de -100 000 ans (ESR : STRINGER *et al.*, 1989 ; ESR et séries Uranium : GRÜN *et al.*, 2005). Le crâne est assez altéré avec quelques zones reconstituées.

-Zuttiyeh 1 : Il ne subsiste de cet individu, découvert en 1925 en Israël, que l'os frontal, un fragment de l'os malaire droit et une portion attenante du sphénoïde. Le fossile est compris entre -200 000 et -250 000 ans (ZEITOUN, 2001). Selon Keith (1927), ce spécimen serait un Néandertalien. Alors que Sohn et Wolpoff (1993) estiment que ce fossile a des caractères communs avec les sinanthropes, Vandermeersch (1981) et Zeitoun (2001) le considèrent comme un *Homo sapiens*.

Les Hominidés juvéniles du Pléistocène supérieur d'Europe et du Moyen-Orient :

-Engis 2 : Il s'agit d'une calvaria d'enfant néandertalien d'âge compris entre 7 et 9 ans. Elle a été découverte en 1829-1830 par P.-C. Schmerling dans la région de Liège, Belgique. Les datations situent le site entre -85 000 et -40 000 ans BP. Il s'agit du premier reste néandertalien chronologiquement découvert, mais reconnu qu'après la découverte de l'Homme de Neandertal (LEGUEBE, 1986a, 1986b).

-La Quina H18 : Reste d'un néandertalien juvénile découvert en août 1915 à Gardes-le-Pontaroux, Charente, France. Le crâne correspond à un enfant de 6-8 ans. Comme La Quina H5, cet individu est daté de -65 000 ans BP (MELLARS, 1986).

-Teshik-Tash 1 : Garçon néandertalien découvert dans une sépulture en 1938 par A. P. Okladnikov en Ouzbékistan. L'étude du crâne, reconstitué à partir de 150 fragments, a permis d'estimer un âge de 8 à 10 ans à la mort de l'individu (ULLRICH, 1955 ; TATTERSAL, 1988). Le crâne présente déjà un début de torus frontal ainsi qu'un chignon occipital.

Les individus modernes

Les crânes étudiés proviennent en majorité de la nécropole historique de Notre-Dame-du-Bourg à Digne (Alpes-de-Haute-Provence, France, III-XVII^{ème} siècle) fouillée par G. Démians d'Archimbaud (2002). La collection est en cours d'étude anthropologique sous la direction de B. Mafart. La détermination du sexe de ces individus a été réalisée au moyen de l'analyse du bassin (DEBONO *et al.*, 2004). Nous n'avons examiné que des crânes adultes possédant le nombre minimum de points de repères étudiés, soit 96 individus (34 hommes, 32 femmes et 30 individus de sexe indéterminé).

A cet échantillon ont été ajouté des crânes d'autres sites historiques comme la nécropole de Saint-Pierre de l'Almanarre, Olbia, Hyeres, Var (4 crânes utilisés; MAFART, 1996), la nécropole paléochrétienne et médiévale rurale de La Gayole, Var (3 crânes utilisés ; MAFART, 1984), et Fréjus (6 crânes utilisés).

Fossiles et individus n'appartenant pas au genre *Homo*

Nous avons intégré à notre étude trois crânes de chimpanzés (deux femelles et un mâle), sept gorilles (quatre mâles et trois femelles) ainsi que ceux de deux *Australopithecus africanus* et de six Paranthropes (*Paranthropus boisei* et *Paranthropus aethiopicus*). Ces individus ne sont pas utilisés dans le cadre d'une comparaison phylétique. Nous nous en

servons, au risque d'une dispersion par rapport à notre sujet, pour comparer la variabilité des espèces qui composent le genre *Homo*. L'utilisation des *Australopithecus africanus* et des Paranthropes est aussi justifiée par la remise en cause par certains auteurs (WOOD *et al.*, 1999a, 1999b, 2000) de l'attribution phylétique des *Homo habilis* et *Homo rudolfensis* au genre *Homo*, et par leur proposition de reclassification dans le genre *Australopithecus*.

Les *Australopithecus africanus* :

-Sts 5 (Mrs Ples ou Sterkfontein 5) : Crâne d'un individu féminin adulte découvert en avril 1947 par Robert Broom et John T. Robinson dans le Membre 4 de Sterkfontein en Afrique du Sud (BROOM, 1947). Les données géomorphologiques établissent un âge de 3,3 Millions d'années (PARTRIDGE, 1973) contre 2,7 à 2,2 pour les données fauniques (JOHANSON *et al.*, 1983) pour ce petit crâne prognathe. Une nouvelle datation s'appuyant sur la faune de Sterkfontein donne un âge compris entre -1,5 et -2,5 Ma pour les *Australopithecus africanus* (BERGER *et al.*, 2002). Nous avons utilisé les données numériques du CD ROM Sts 5 (Mrs Ples) de la collection « FOSSIL HOMINIDS » de l'Institut d'Anthropologie de l'Université de Vienne (WEBER *et al.*, 2002). L'original est conservé au Transvaal Museum à Pretoria, Afrique du Sud.

-Sts 71 : Il ne subsiste de ce spécimen qu'un héli-crâne droit complet et des fragments de la partie gauche (notamment le maxillaire). Il a été découvert en 1947 par le Dr Broom à Sterkfontein, Afrique du Sud, lui aussi dans le Membre 4. Selon Vrba (1982) le spécimen serait daté de -2,6 à -2,8 Ma après corrélation faunique. Une datation faunique plus récente de ce site donne un âge de -1,5 à -2,5 Ma pour Sterkfontein (BERGER *et al.*, 2002). Nous avons symétrisé virtuellement la reconstruction tridimensionnelle du fossile, suivant la procédure de Conroy *et al.* (2000a). Il est considéré comme individu masculin depuis l'examen de J. Wallace en 1972.

L'original est conservé au Transvaal Museum à Pretoria, Afrique du Sud. Nous avons utilisé les données numériques du CD ROM Sts 71 de la collection « FOSSIL HOMINIDS » de l'Institut d'Anthropologie de l'Université de Vienne (WEBER *et al.*, 2001).

Les *Paranthropus boisei* :

-KNM-ER 406 : Calvarium d'un *Paranthropus boisei* (WOOD, 1992b) découvert en 1978 par M. G. et R. E. F. Leakey dans l'aire 10 de la zone d'Ileret dans le « KBS Member » de la

« Koobi Fora Formation », sous le complexe Okote, au Kenya. Cette position stratigraphique suggère selon Wood (1991) un âge compris entre -1,65 et -1,7 Ma.

-KNM-ER 13750 : Calotte crânienne fragmentaire (fractures et pertes sur l'hémi-crâne gauche) d'un spécimen de *Paranthropus boisei* daté de 1,9 Ma (FALK *et al.*, 2000).

-KNM-ER 23000 : Calvaria d'un *Paranthropus boisei* mâle adulte découverte dans la zone 104 de Koobi Fora, Lac Turkana, Kenya. Les sédiments dans lesquels le spécimen a été retrouvé ont été datés de 1,9 Ma (BROWN *et al.*, 1993). Les restes correspondraient à un jeune mâle adulte. Le torus frontal est similaire à celui d'OH 5. La crête sagittale est visible bien qu'émoussée.

-OH 5 : Crâne reconstitué à partir des fragments d'un même individu. Découvert en juillet 1959, dans la vallée d'Olduvai, Tanzanie, par Mary D. Leakey (LEAKEY, 1959), cet adulte male daterait de -1,8 Million d'années (K/Ar). Il correspond à plusieurs appellations phylogéniques : *Zinjanthropus boisei*, *Australopithecus boisei*, *Paranthropus boisei*. Nous avons utilisé la reconstitution réalisée par Clarke sous la direction de Tobias (1967).

-Omo Membre E L 338 : Restes crâniens postérieurs fragmentaires (pariétaux et occipital), découverts dans la vallée de l'Omo en 1967 sous la direction de R. E. F. Leakey, appartenant à un individu juvénile (7–8 ans ; WHITE *et al.*, 1999). Cet individu est considéré comme un *Paranthropus boisei* de -2,4 Ma (WHITE *et al.*, 1999 ; FALK *et al.*, 2000 ; ALEMSEGED *et al.*, 2002).

Paranthropus aethiopicus :

-KNM-WT 17000 : Crâne découvert le 29 août 1985 sur la rive ouest du lac Turkana, Kenya (WALKER *et al.*, 1986). Attribué d'abord au *Australopithecus boisei* (WALKER *et al.*, 1986), le crâne noir ou « Black Skull » présente de nombreuses fractures (notamment absence de la partie supérieure de l'écaille frontale et des bords antérieurs des pariétaux). Il est maintenant considéré comme un *Paranthropus aethiopicus* de 2,6 Ma (FALK *et al.*, 2000).

Chap. III : Méthodes Tridimensionnelles

III.1 Méthodes d'acquisition des données tridimensionnelles

III.1.1 Scanner médical ou Tomodensitométrie à Rayons X

III.1.1.1 Historique et principes

Le scanner à rayonnements X, en anglais computerized tomography (C.T.) est apparu à la fin des années soixante. En radiologie classique, le faisceau de rayon X projette sur une plaque radiographique les ombres des organes traversés en les confondant. Les zones entourées par des tissus plus denses (comme les os) ne sont donc pas visibles. Le scanner X pallie à cet inconvénient. Son principe est en effet de choisir un plan de coupe et d'effectuer de multiples projections sous différents angles afin de connaître le coefficient d'atténuation en chaque point du plan.

Les rayons X sont atténués par les milieux biologiques traversés suivant une loi exponentielle tenant compte de l'absorption photoélectrique et de la diffusion par effet Compton. Soit I_0 le flux incident de rayons X pénétrant suivant l'axe x un milieu hétérogène de coefficient d'atténuation $\mu(x)$, et I le flux émergent, nous avons la relation suivante :

$$I = I_0 \cdot \exp(-\int \mu(x) dx)$$

Le scanner X est basé sur la mesure des différents coefficients d'absorption des tissus traversés par un faisceau de rayons X. Chaque tissu a son coefficient d'absorption propre qui dépend de la densité du tissu et de l'énergie du faisceau du rayon X le traversant.

La réalisation la plus simple d'un scanner X nécessite donc un émetteur de rayons X et un détecteur qui lui est solidaire. Le corps étudié est bien sûr placé entre l'émetteur et le détecteur. En animant simultanément d'un mouvement de translation le faisceau de rayons X et le détecteur, on connaît les projections des coefficients d'absorption en plusieurs points pour un angle donné par rapport à l'objet. Ensuite on fait tourner le système de quelques degrés, et on recommence une série de mesures lors de la nouvelle translation. Cette opération est répétée sur 180 degrés, et la connaissance des profils d'absorption suivant les différents angles permet de calculer la valeur de l'absorption en chaque point du plan (figure 10).

Les calculs sont réalisés par ordinateur pour reconstituer une image plane numérique en donnant à chaque pixel un niveau de gris correspondant au coefficient d'absorption. Cette image pourra alors être stockée ou traitée informatiquement.

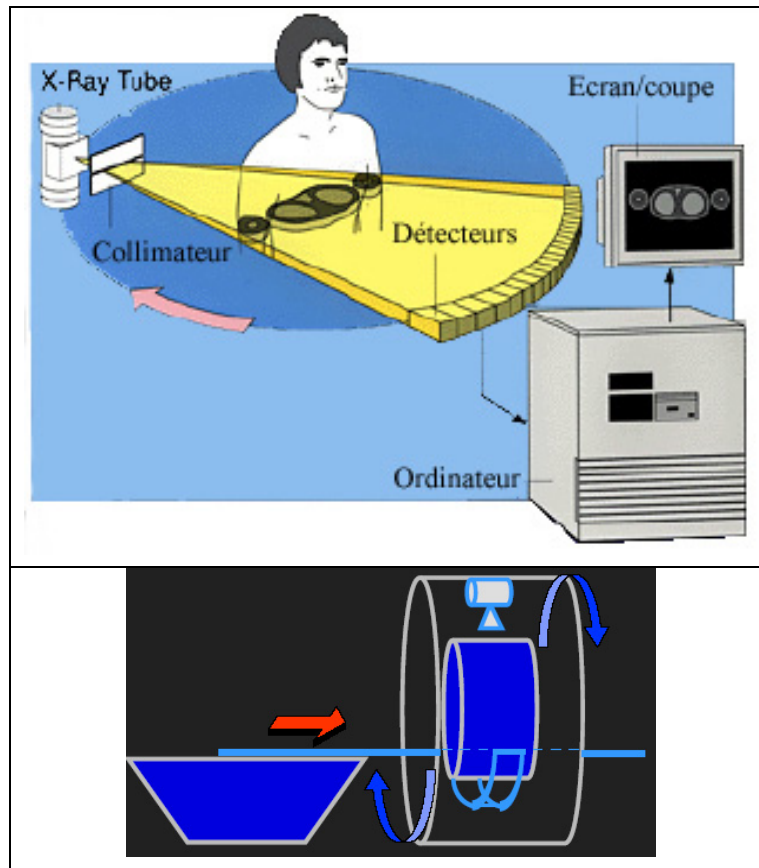


Figure 10 : Principes du Scanner médical à rayonnement X.

Les systèmes tomodensitométriques à rayonnement X ont beaucoup évolué depuis le premier prototype, constitué uniquement d'un tube à rayons X et d'un détecteur entre lesquels était placée la cible. Dans les scanners de deuxième génération, au lieu d'envoyer un pinceau de rayons X vers un seul détecteur, le tube envoie un faisceau plus ouvert capté par plusieurs détecteurs. Ceci permet de réduire le nombre de déplacements de l'ensemble tube – détecteur lors des translations mais aussi de réduire le nombre de pas angulaires. Ceci se traduit par une amélioration de la vitesse de balayage. La troisième génération a vu disparaître la translation, la barrette détectrice étant suffisamment longue pour accepter tout le champ de mesure et tournant de façon synchrone avec le tube à rayons X. Toujours afin de réduire les temps d'acquisition et d'améliorer la qualité des images, de nouveaux scanographes utilisant des chaînes de détection à multi-détecteurs ont fait leur apparition. C'est le cas pour les scanners X de la quatrième génération : le tube tourne seul dans une couronne comprenant de nombreux détecteurs fixes (de l'ordre de 800 à 1000).

De nouvelles technologies sont apparues récemment (cinquième génération). Afin de réduire l'effet de pénombre par une meilleure focalisation et augmenter la distance patient – tube, cette nouvelle génération place le tube à rayons X en dehors de la couronne. Cette

couronne est animée d'un mouvement de nutation, les détecteurs proches du tube s'effaçant pour laisser passer le rayonnement incident.

Dernier développement de la technologie : les scanographes à acquisition hélicoïdale rapide. Cette technique requiert un scanographe à rotation continue et rapide de la source radiogène ainsi qu'un puissant multiprocesseur qui assure simultanément des tâches d'acquisition, de reconstruction et de visualisation. A la suite d'opérations d'interpolation, le processeur reconstruit une série de coupes axiales qui présentent entre elles un certain degré de chevauchement.

III.1.1.2 Acquisition des données tridimensionnelles par CT Scan

La numérisation des originaux et moulages de crânes fossiles et historiques issus de la collection du laboratoire d'anthropologie de la Faculté de Médecine, secteur Nord, Marseille (2003) a été effectuée dans les services du Professeur Agostini, à l'hôpital Sainte-Marguerite à Marseille, ainsi que dans les services du Professeur Cabanis, C.H.N.O. des Quinze-Vingts, Paris.

Les spécimens (43) ont été sélectionnés en fonction de leur état et de manière à avoir au moins deux individus de chaque espèce (sauf pour le gorille). La population historique est composée de 9 individus (4 hommes et 5 femmes). La liste des individus numérisés par tomodensitométrie à rayon X est présentée en Annexe 1.

Les scanners à rayonnement X ont été réalisés et enregistrés sous format DICOM sur une machine Général Electric LightSpeed 16. Nous avons réalisé une hélice en coupes de 1,25 mm reconstruites tous les 0,625 mm avec un temps de rotation de 0,7 tour/s. Nous avons utilisé une matrice 512*512 pixels, un SFOV (Field of view) de 250 mm, soit une résolution de 0,48mm. Les Kv et mA changent à chaque patient. La taille des pixels varie à chaque numérisation, en fonction de la taille générale du crâne.

Le choix de la taille et de l'épaisseur des coupes a été fait en fonction de différents paramètres. Afin d'obtenir une reconstruction virtuelle avec un rendu surfacique de bonne qualité, il est nécessaire de réaliser des coupes les plus fines possibles (figure 11). Plus les coupes sont fines et nombreuses, plus nous pouvons obtenir et restituer les informations. L'empilement des coupes fines permet de lisser un peu plus le contour de l'objet reconstitué sans générer trop d'aberrations.

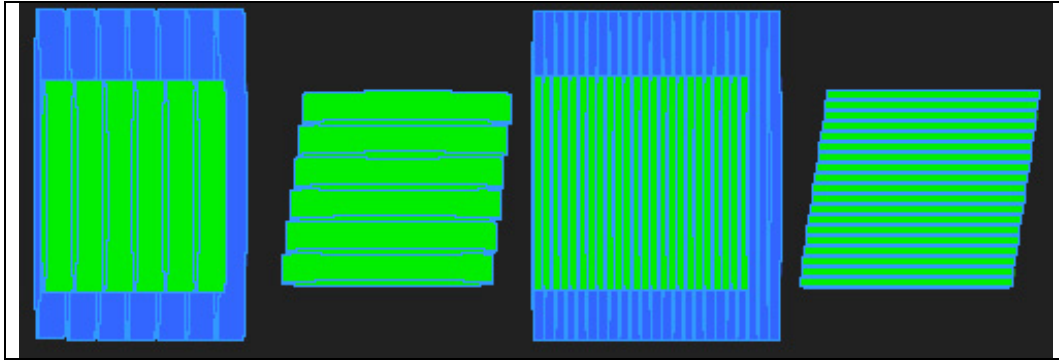


Figure 11 : Lien entre le nombre de coupes, leur taille et le rendu surfacique.

III.1.1.3. Exploitation des données et reconstruction virtuelle

La taille des pixels ou « slice thickness » (en mm) a été systématiquement déterminée au moyen du logiciel Ezdicom. Celui-ci a permis de chaque fois lire le « header », c'est-à-dire les informations concernant chaque coupe numérisée, et de déterminer pour chaque scanner la taille des pixels. Cette valeur revêt son importance lors du rendu des images dans l'espace. En effet, plus la taille rendue par les pixels est grande, plus la marge d'erreur est grande. Braüer *et al.* en 2003 expliquaient que pour des pixels de 0,41 mm et pour une épaisseur de coupe de 1 mm, l'écart maximal entre la position d'un point modélisé par un voxel et le vrai point était alors de 1,1 mm. En moyenne, nous avons eu une taille de pixels équivalente à 0,44 mm. Le bon réglage de la taille des pixels lors de la modélisation virtuelle est très important. En effet, sans cela, la reconstitution apparaîtra déformée dans certains plans (figure 12). Dans l'exemple présenté, les deux crânes modélisés possèdent la même longueur apparente, mais diffèrent nettement au niveau des hauteurs.

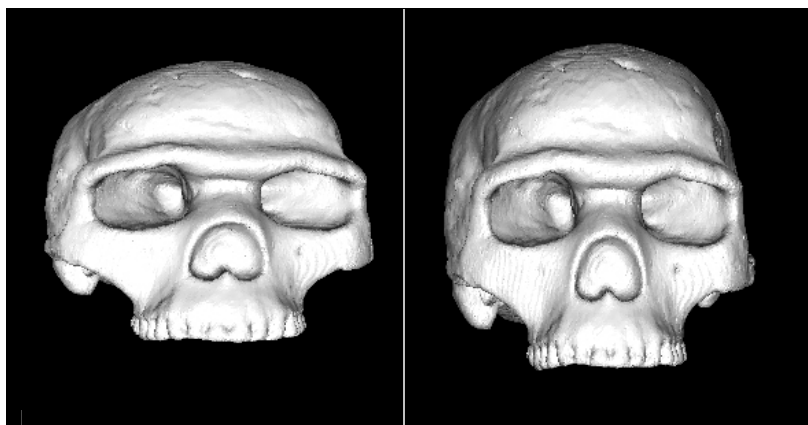


Figure 12 : Distorsion extrême de la reconstruction tridimensionnelle du crâne de Skhul 5 (gauche) et reconstruction correcte (droite).

III.1.1.3.1 Nombre de sommets délimitant le crâne à modéliser

Pour modéliser un crâne numérisé, les différents logiciels de modélisation tridimensionnelle utilisent des sommets de triangles constituant la surface du crâne. Plus le nombre de sommets est élevé, plus ceux-ci sont proches les uns des autres et permettent une modélisation plus fine et plus proche de la réalité. Nous présentons en figure 13 un contour à modéliser (bordure extérieure en noir). Les différents carrés représentent des sommets. La mise en place d'un seul point central (carré), en plus des extrémités, converti la courbure en triangle. L'ajout de deux autres sommets intermédiaires permet de rapprocher la modélisation de la courbure réelle. Le volume non modélisé diminue (arc de cercle blanc dans le cas de trois sommets, et zone grise et blanche dans le cadre d'un seul sommet).

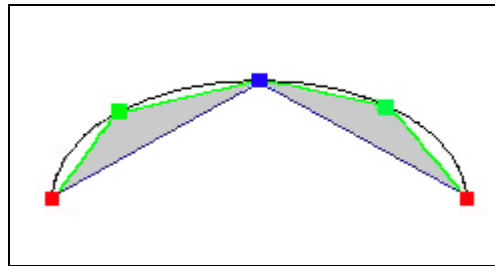


Figure 13 : Difficulté du rendu d'un contour crânien. Le contour réel est en noir; les segments correspondent aux contours modélisés

Nous présentons en figure 14 différentes reconstructions virtuelles d'un crâne d'*Homo sapiens* issu de la population historique de Notre-Dame-du-Bourg. Les différentes reconstitutions volumiques permettent de mettre en évidence l'importance du choix du nombre de sommets à modéliser. Un nombre faible ne permet pas de modéliser correctement les structures crâniennes : à 1000 sommets, seul l'expérimentateur travaillant sur la reconstitution peut dire qu'il s'agit d'un crâne virtuel. A partir de 10 000 sommets, la forme générale du crâne est nette et les différentes cavités sont identifiables. Selon la morphologie des individus, il est même possible de distinguer les tracés de certaines sutures crâniennes (suture coronale). La valeur de 100 000 sommets donne un résultat virtuel proche de la réalité. Les sutures sont toutes visibles tout comme les cuspides des dents. Utiliser 500 000 sommets n'apporte que peu de modifications et se trouve être une source de problèmes techniques. Paradoxalement, un grand nombre de sommets s'avère nécessaire pour travailler correctement et avoir une représentation quasi fidèle de la réalité, mais ce grand nombre de sommets est responsable d'une lenteur d'affichage du crâne. En effet, chaque mouvement appliqué à la reconstitution nécessite un calcul permanent des données affichées à l'écran. Plus le nombre

de données (sommets et triangles) à afficher sera élevé, plus le processeur calculera et l’affichage nécessitera plus de temps et apparaîtra saccadé.

Un autre problème apparaît dans le choix du nombre de sommets. Au-dessus d’une certaine valeur, l’utilisateur se heurte à la résolution des données numériques. Par exemple sur notre crâne modélisé, les 500 000 sommets entraînent l’apparition de la distinction des coupes scanners au niveau du sommet du crâne.

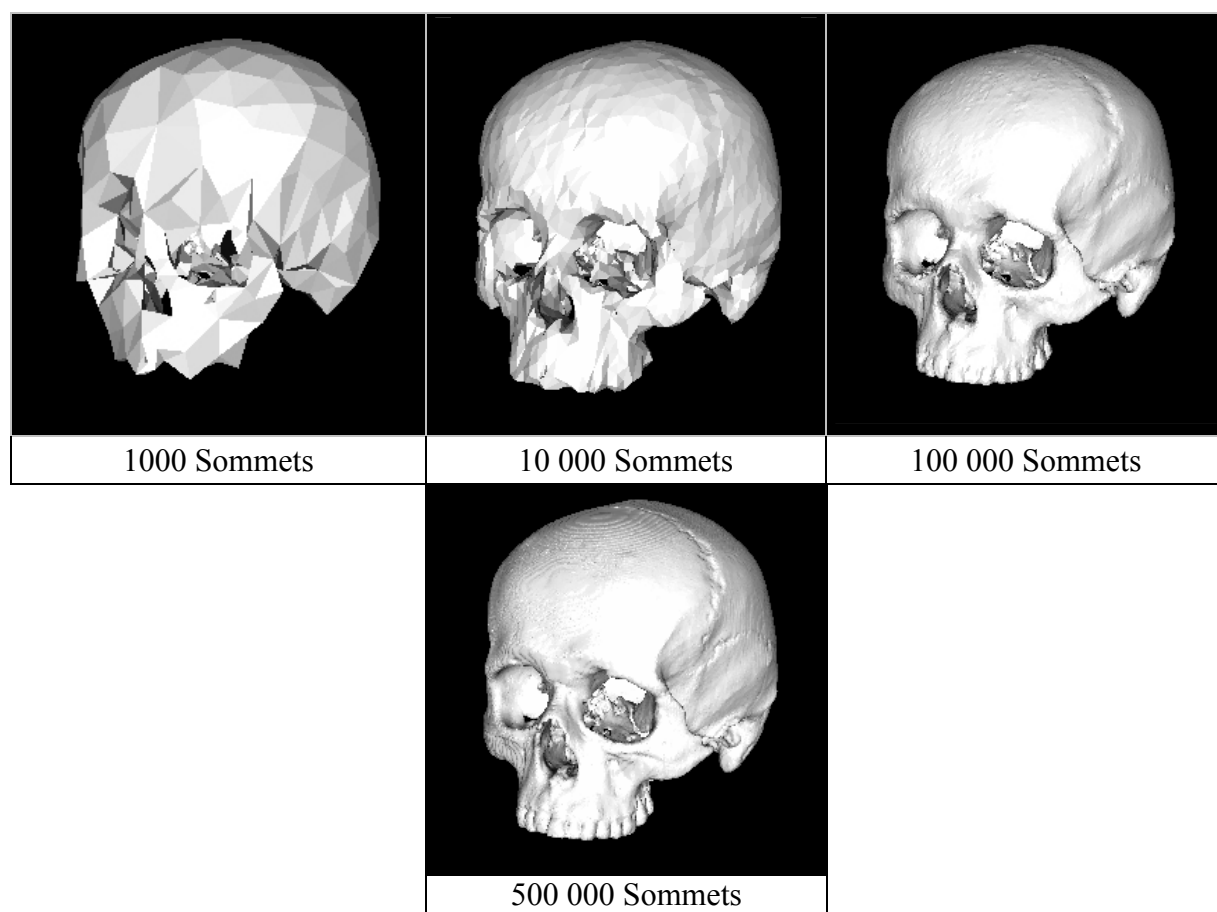


Figure 14 : Rendu volumique des reconstitutions en fonction du nombre de sommets générés.

En raison de tous ces éléments, et après étude de tous les crânes numérisés, nous avons choisi de générer pour chaque crâne 150 000 sommets, valeur permettant d’avoir un rendu volumique et surfacique précis tout en conservant une grande fluidité d’affichage et de manipulation de l’image virtuelle.

III.1.1.3.2 Le rendu surfacique des modélisations

Les logiciels (Yav++, Magics, RapidForm2004) permettent différents rendus surfaciques (4 principaux, figure 15). Nous allons présenter les 4 principaux rendus utilisés :

- 1/ Le mode Wireframe constitue le rendu surfacique de base des logiciels. Il peut être traduit par mode « fil de fer » : les sommets sont reliés aux sommets voisins par des segments constituant les arêtes de triangles transparents.
- 2/ Le mode Flat consiste à appliquer un revêtement coloré sur les triangles précédemment définis.
- 3/ Le mode Gouraud permet de lisser les sommets des triangles. Ce mode a tendance à estomper les sutures et autres structures fines qui sont bien rendues par le Flat. Un grand nombre de sommets modélisés permet de lisser le rendu Flat en générant des triangles plus petits et plus nombreux.
- 4/ Le mode Transparent permet d'observer (pour les crânes osseux) les structures internes telles que les cavités sinusales. Ce mode est intéressant lorsqu'il s'agit d'afficher ensemble deux crânes et de les superposer.

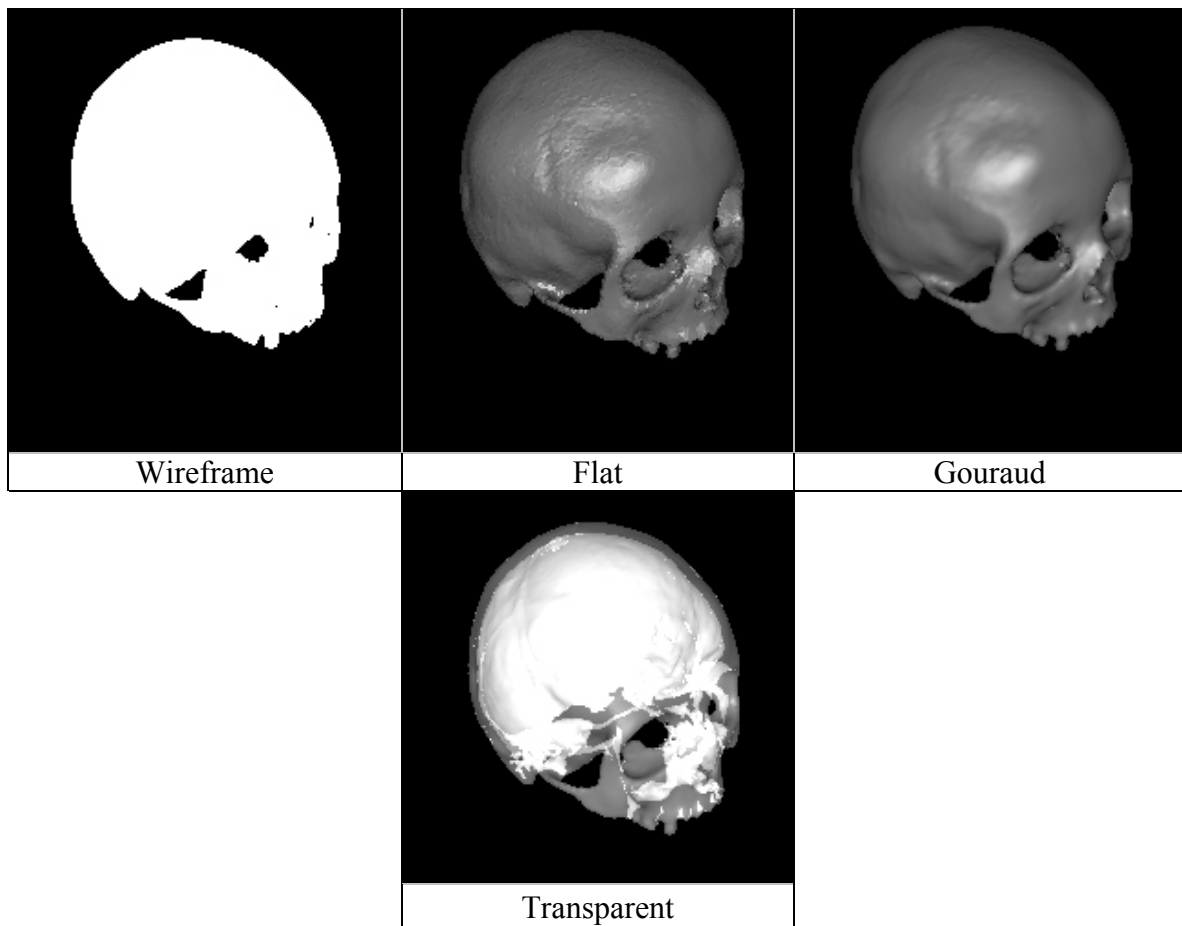


Figure 15 : Différentes textures applicables aux reconstructions virtuelles (Yav++).

III.1.1.3.3 La notion de seuillage

Les données numérisées ne contiennent pas de valeurs de couleurs permettant de dissocier les différentes matières ou textures détectées par le scanner. Le système a été conçu de manière à retranscrire ces différences (Echelle de Hounsfield, figure 16) par des niveaux de gris. Chaque matière possède une valeur caractéristique permettant de la différencier d'une autre.

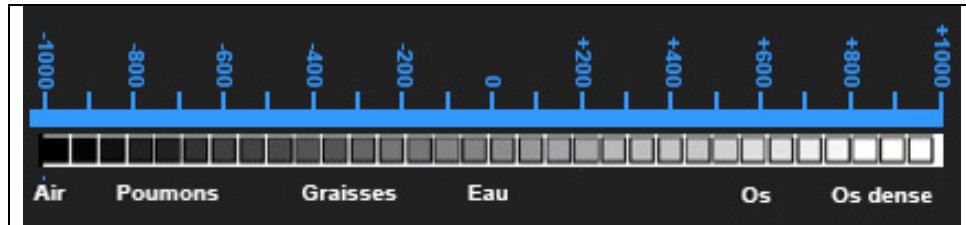


Figure 16 : Echelle de Hounsfield.

Le logiciel Yav++ (principalement utilisé) prend en compte ces niveaux de gris mais avec sa propre échelle et permet de reconstituer un objet en sélectionnant la valeur minimale à afficher. Toutes les matières possédant une valeur inférieure sur l'échelle de Hounsfield modifiée ne seront pas prise en compte dans la reconstitution et ne seront pas affichées. La réalisation d'un bon seuillage est importante (figure 17).

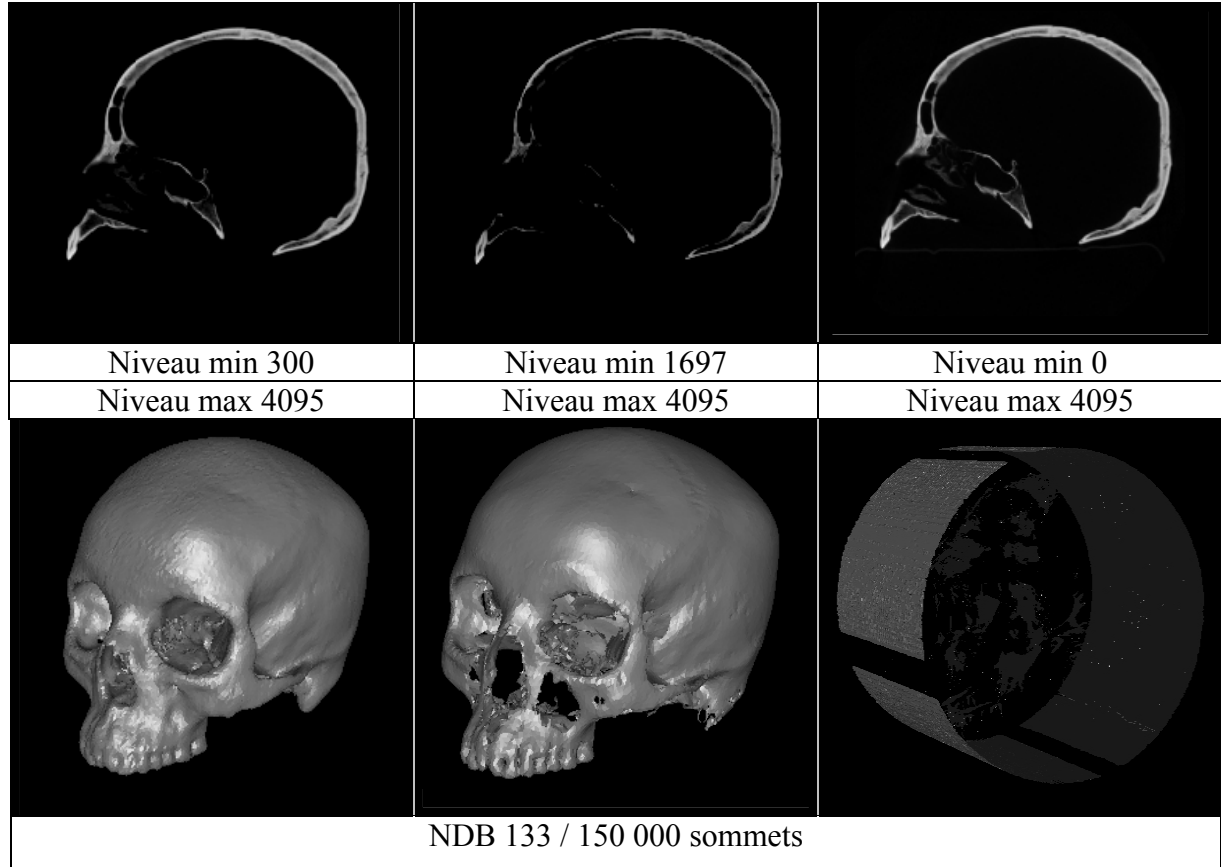


Figure 17 : Différents niveaux de seuillage et rendus volumiques (crâne d'*Homo sapiens*).

Dans l'exemple présenté une portion du crâne ne sera pas reconstituée lors du choix d'une valeur minimale de 1697. Il s'agit des parties les moins épaisses ou les moins denses. Dans le cadre de la valeur minimale 0 ou d'une valeur trop basse (figures 17 et 18), le support sera lui aussi modélisé ainsi que la cavité d'acquisition du scanner elle-même, ce qui sera source d'inconvénients pour exploiter correctement le modèle virtuel.

La valeur idéale (non modélisation du support sans altération de la surface crânienne) moyenne relevée pour les crânes osseux et une partie des moulages était de 300. Pour certains moulages et supports utilisés, la valeur minimale a pu monter à 700.

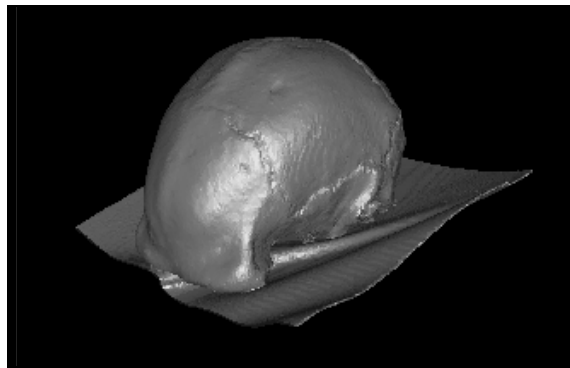


Figure 18 : Exemple de mauvais seuillage (crâne de Sambungmacan 3)

III.1.2 Acquisition spatiale des points craniométriques au moyen d'un digitaliseur portable : MicroScribe®3DX

Nous avons utilisé l'outil d'immersion et de capture tridimensionnel MicroScribe, conçu par le groupe Immersion Corporation, le modèle MicroScribe®3DX (figure 19).



Figure 19 : MicroScribe®3DX.

Cet outil de relevé de points de contours consiste en un bras digitaliseur articulé muni d'un contrepoids, déplaçable manuellement. Le bras est prolongé à son extrémité par une pointe de lecture, métallique servant à pointer précisément des repères dans l'espace (figure 20).

Le logiciel permettant d'utiliser cet outil, calcule en permanence la position spatiale de l'extrémité de la pointe par rapport à un référentiel de base dans les trois directions euclidienne (x, y, z). Une fois la pointe appliquée sur la zone à numériser, l'utilisation d'un déclencheur (pédale) permet d'enregistrer la localisation tridimensionnelle de la pointe. Le logiciel implanté sur la station de travail PC permet d'enregistrer les coordonnées spatiales des points sous différents formats d'exploitation. Notre préférence est allée aux fichiers Excel afin de posséder une base de donnée facilement échangeable sans obligation de conversion.

La résolution moyenne de cet outil est de 0,13 mm (données du fabricant) pour une précision moyenne de 0,38 mm. La vraie variabilité des mesures provient de l'expérimentateur et de sa manière de placer la pointe de lecture. Le rayon de portée du bras du MicroScribe®3DX est de 632 mm.



Figure 20 : Mouvements possibles du MicroScribe®3DX.

Dans le cadre de l'élaboration d'une base de données MicroScribe®3DX sur les populations fossiles et modernes mises à notre disposition, un travail commun a été réalisé avec Elise Jeusel. 101 points de repères craniométriques ont été sélectionnés et digitalisés. Ce travail commun a permis une vérification permanente des points sélectionnés. Chaque point a été acquis 3 fois et la moyenne a été retenue.

III.2 Méthodes analytiques et Modélisations tridimensionnelles

III.2.1 Difficulté du choix des points de repères (landmarks) craniométriques

Tout crâne peut être modélisé par un certains nombre de points identifiables : points de repères ou landmarks. Un os comme le pariétal peut être représenté par seulement quatre points, chacun correspondant à un angle de cet os et rendant compte des limites de l'os. L'ajout de la bosse pariétale (ou de la zone correspondant) permet alors de modéliser la hauteur maximale de cet os par rapport à ses extrémités. Pour modéliser les contours de l'os, il est possible de rajouter d'autres points. Plus le nombre de points sélectionnés augmente, plus la représentation imagée de l'os va être proche de la réalité.

Deux difficultés apparaissent alors dans le choix de ces points. L'une d'elles réside dans la modélisation correcte de l'os sans utiliser des centaines de milliers de points. Car le passage d'une extrême (trop peu de points ; figure 21) à l'autre (trop de points ; figure 22) n'est pas une solution pour rendre compte correctement de l'évolution des structures ou contours anatomiques (figure 23).

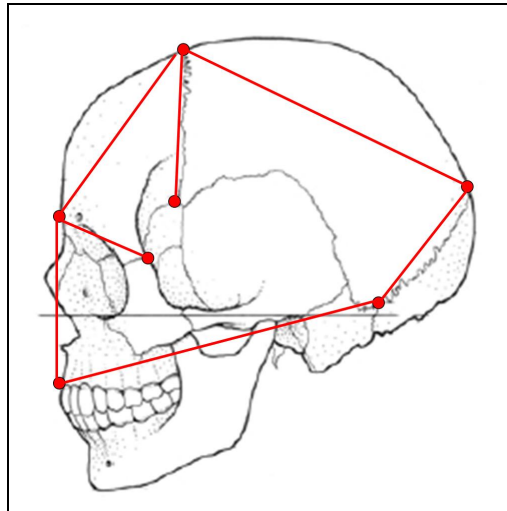


Figure 21 : Exemple de " sous-modélisation ".

La figure 21 représente ce que nous estimons être une « sous-modélisation », c'est-à-dire une modélisation trop simplifiée (dans le cadre d'une étude de l'ensemble du crâne) par manque de points de repères. Il est impossible de comparer autre chose que les points de repères et leur modélisation. Si nous prenons comme sujet la courbure de l'os frontal, il s'avère impossible de parler de l'évolution de la courbure de celui-ci, celle-ci se jugeant au moyen de l'angle nasion – point le plus élevé (métopion) – bregma. On ne peut alors que

parler que de l'étirement de l'os et non de l'aplatissement de l'écaille. Cette information est perdue pour l'expérimentateur.

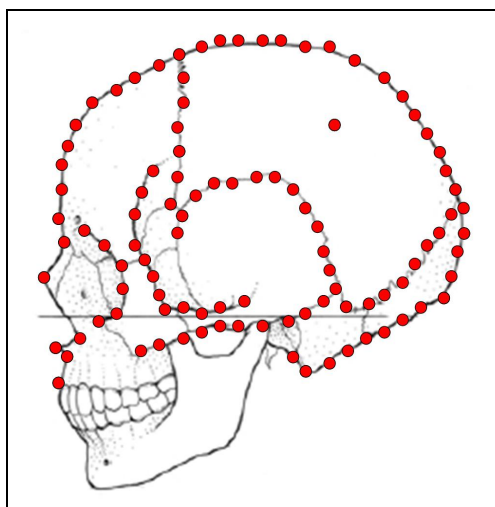


Figure 22 : Exemple de " sur-modélisation ".

La figure 22, « sur-modélisation », s'avère superflue. Trop de points sont pris en compte sans apporter d'informations exploitables. Si nous reprenons l'exemple de l'os frontal et de sa courbure sagittale, nous constatons que celle-ci est quantifiable grâce à seulement trois points et que le reste apparaît comme inutile. Le travail s'apparente à de l'analyse surfacique. Ce type de modélisation devient vite irréalisable avec des fossiles, beaucoup ne présentant pas une surface continue, et par conséquent tous les points recherchés.

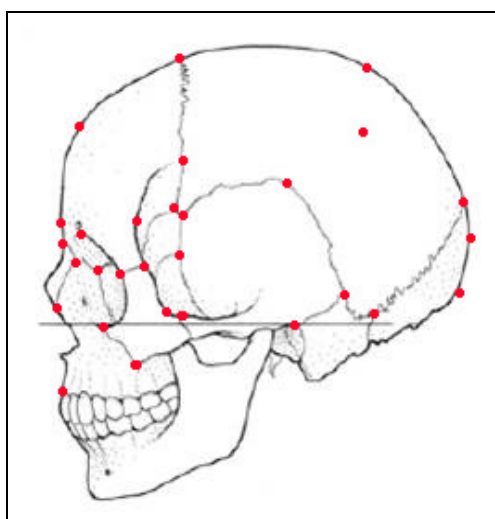


Figure 23 : Exemple de points de repères possibles et utilisables.

Il est donc nécessaire de sélectionner les points de repères utilisés avec rigueur en fonction de la zone à étudier (figure 23).

L'autre difficulté correspond à la reproductibilité des points, la capacité pour un expérimentateur extérieur d'utiliser les mêmes points de manière précise. Dans le cadre de la « sur-modélisation », cette prérogative nécessaire à la vérification d'une étude ou à la validation d'une méthode de travail s'avère quasiment impossible à atteindre.

III.2.2 Modélisation et liste des points de repères craniométriques

Afin de tenir compte de ces deux impératifs, les points de repères sélectionnés correspondent aux points craniométriques, définis en 1914 par R. Martin et K. Saller (MARTIN *et al.*, 1957).

III.2.2.1 Définition des points de repères craniométriques utilisés

Nous présentons dans le tableau 2 les noms, abréviations et définitions des points de repères utilisés au cours de nos différentes modélisations et reconstitutions. Ces points sont présentés en position anatomique en figure 24.

Tableau 2 : Liste des points de repères craniométriques utilisés.

Points de repères & abréviations		Définitions	Classe Bookstein & nombre	
Astérion	As	Point de rencontre des sutures lambdoïde, occipito-mastoïdienne et pariéto-mastoïdienne.	I	x2
Basion	Ba	Point le plus antérieur du rebord externe du foramen magnum.	II	
Bosse pariétale	Bp	Point de voussure de l'écaille pariétale.	III	x2
Bregma	B	Point de rencontre des sutures coronale et sagittale.	I	
Fronto-malaire temporal	Fmt	Point le plus externe de la suture fronto-malaire sur la face latérale du processus zygomatique (MARTIN <i>et al.</i> , 1957 p451).	I	x2
Fronto-temporal	Ft	Point le plus en avant et en dedans de la crête temporale supérieure, dans le prolongement de l'os zygomatique. Le segment entre les deux points fronto-temporaux correspond au diamètre minimal de l'os frontal (MARTIN <i>et al.</i> , 1957, p448).	II	x2
Glabelle	Gl	Point le plus proéminent entre les arcades sourcilières dans le plan sagittal.	II	
Incisure pariétale		Point correspondant à une encoche formée entre le bord circonférentiel de l'écaille temporale et le bord circonférentiel de la mastoïde (PATURET, 1951).	I	x2
Jugal	Ju	Point de rencontre du bord postéro-supérieur de l'apophyse orbitaire de l'os malaire avec le bord supérieur du processus temporalis.	II	x2
Kroptaphion	K	Point de rencontre des sutures pariéto-temporale,	I	x2

		pariéto-sphénoïdale et sphénoïdo-temporale. Ce point peut être confondu avec le sphénion.		
Lambda	La	Croisement des sutures sagittale et lambdoïde. Si des os wormiens sont présents, prolongement des directions de la sagittale et des deux branches de la lambdoïde. Le lambda correspond à la jonction de ces trois directions. Sinon, prendre le milieu du segment de droite formé sur la ligne sagittale.	I	
Métopion	M	Point le plus élevé du frontal au-dessus de la ligne Nasion-Bregma.	II	
Nasion	Na	Point médian de la suture fronto-nasale, à la jonction entre le frontal et les os propres du nez.	I	
Opisthocranion	Op	Point occipital sagittal le plus distant du nasion.	II	
Sagittum	Sa	Point le plus élevé de la voûte crânienne par rapport à la ligne bregma – lambda.	II	
Point supraglabellaire	Sg	Point le plus profond de la fosse supraglabellaire dans le plan sagittal médian.	II	
Porion	Po	Point le plus élevé du trou auditif, en avant de l'extrémité de la <i>spina supra meatum</i> et au même niveau qu'elle.	II	x2
Prosthion	Pr	Point le plus antérieur dans le plan sagittal du bord alvéolaire du maxillaire.	II	
Sphénion	Sphn	Point de rencontre des sutures coronale, pariéto-sphénoïde et sphénoïdo-frontale.	I	x2
Stéphanion	St	Point où la ligne courbe temporale supérieure coupe la suture coronale. Il faut préciser que la définition du stéphanion fait l'objet d'une controverse selon les auteurs. Martin <i>et al.</i> (1957, p.447), estimait qu'il s'agissait du point où la ligne courbe temporale inférieure coupe la suture coronale. Pour notre part, nous utilisons la définition de Paturet (1951, p.271), en ne considérant que la ligne temporale supérieure, plus aisée à distinguer sur les fossiles étudiés (moulages et originaux).	I	x2

Afin d'avoir un nombre suffisant d'individus à analyser et de rendre le mieux compte des différences conformationnelles entre eux, différentes modélisations tridimensionnelles ont été envisagées et réalisées.

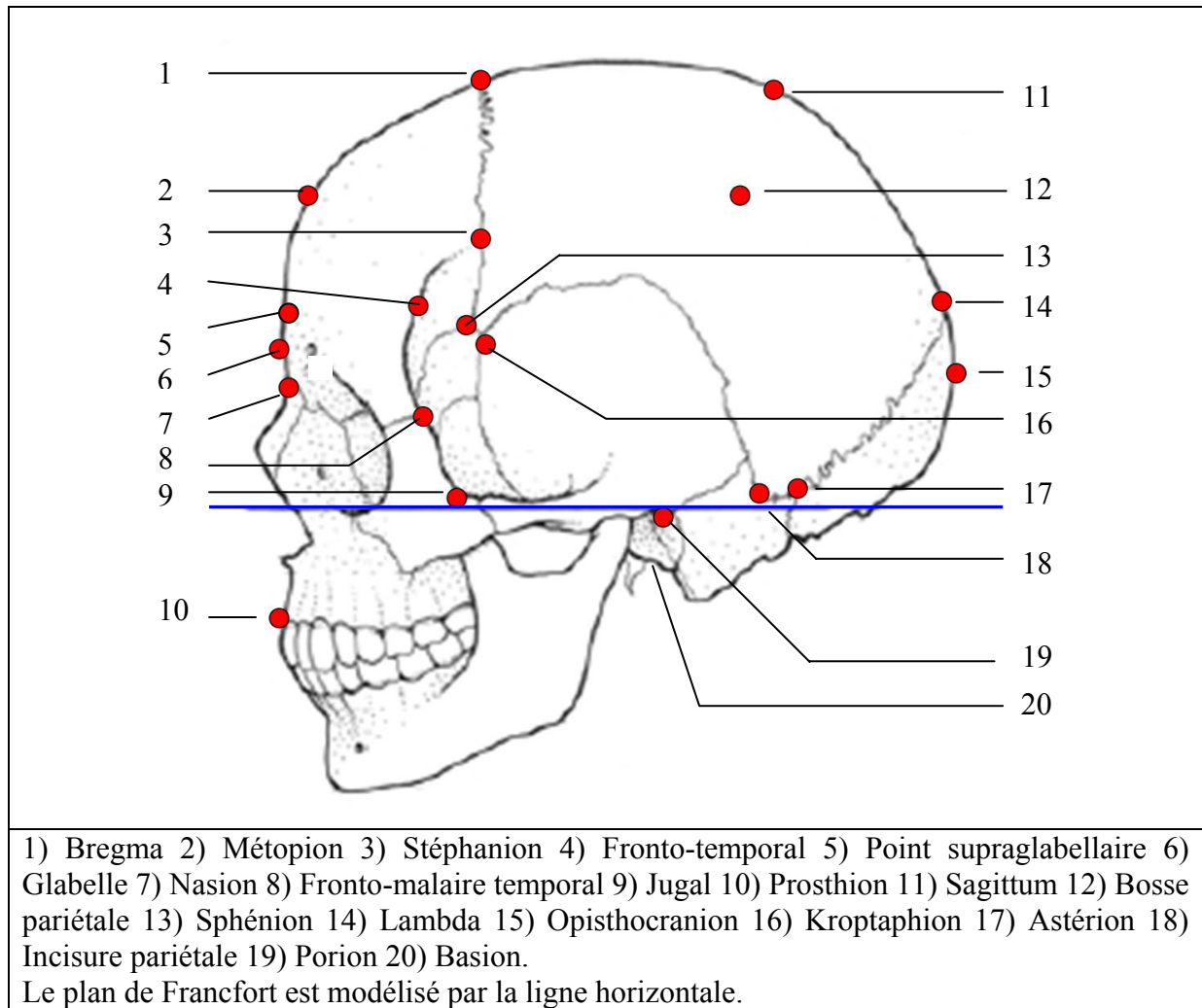


Figure 24 : Points de repères craniométriques en projection latérale gauche.

III.2.2.2 Modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques

Pour modéliser l'ensemble du crâne et rendre compte de la forme générale de celui-ci, 24 points de repères craniométriques ont été sélectionnés (tableau 3).

L'axe nasion – prosthion et l'axe nasion – bregma permet de modéliser l'angle de la face avec le neurocrâne et d'étudier l'évolution du prognathisme maxillaire. Nous n'avons pas tenu compte des points de repères classiques compris entre le nasion et le prosthion en raison de la grande fragilité de ceux-ci sur les fossiles. La zone du torus orbitaire a été modélisée sagittalement au moyen du nasion et du bregma. Pour étudier la courbure de l'os frontal ainsi que celle de la voûte bipariétale nous avons choisi comme points de repère le métopion, le bregma, le lambda ainsi que le sagittum entre ces deux derniers. Prendre plus de points sagittaux nous est apparu inutile et non pertinent.

Tableau 3 : Points de repères craniométriques utilisés lors de la modélisation tridimensionnelle du crâne.

Astérion (2)	Bosse pariétale (2)	Bregma	Fronto-malaire temporal (2)
Fronto-temporal (2)	Glabelle	Jugal (2)	Lambda
Métopion	Nasion	Opisthocranion	Sagittum
Porion (2)	Prosthion	Sphénion (2)	Stéphanion (2)

La courbure coronale de l'os frontal, indiquant la forme générale du contour crânien antérieur, est modélisable au moyen des stéphanions et des sphénions. Nous n'avons pas sélectionné de points entre les stéphanions et le bregma en raison de la difficulté de trouver ou construire un point facilement transposable suivant les espèces. Nous aurions pu sélectionner le point médian, ou le point le plus haut entre les deux, mais un tel point n'apporte aucune information supplémentaire, n'ayant qu'un effet esthétique sur la représentation.

L'opisthocranion a été préféré à l'inion en raison de l'absence de lien avec des accroches musculaires. Le choix de ce point a permis d'inclure certains crânes présentant un inion fracturé ainsi que d'obtenir une indication sur l'allongement maximal du crâne.

Le choix de l'astérion s'est fait suivant de deux objectifs : 1/ Obtenir une modélisation du contour de l'os pariétal et étudier l'évolution de celui-ci en continuité anatomique avec le frontal et les autres os crâniens ; 2/ Obtenir l'angle astérion – lambda – astérion, indicateur de la largeur occipitale.

Pour représenter les variations de la largeur faciale supérieure et moyenne, les points fronto-malaires temporaux ainsi que les points jugaux ont été sélectionnés. Nous n'avons pas sélectionné de point correspondant à la largeur faciale inférieure en raison de l'état de la population fossile utilisée. La prise en compte du point fronto-temporal permet de rendre compte de la constriction post-orbitaire. La largeur supérieure de la voûte crânienne a été représentée par l'acquisition de la bosse pariétale ou, pour les fossiles anciens, d'un point assimilé.

Ces points sélectionnés (fronto-temporal, fronto-malaire temporal, jugal, porion, sphénion) permettent de modéliser la cavité zygomatique en vues latérale et supérieure. L'utilisation d'autres points aurait été nécessaire pour modéliser plus précisément cette cavité et correspondre plus anatomiquement à cette zone. Mais les contraintes liées à l'état des fossiles, et à la sélection d'un point fiable nous ont amené à ne pas prendre d'autres points.

Afin de mieux appréhender les rapports tridimensionnels entre les points de repères et entre les surfaces définies nous avons réalisé une modélisation que nous appelons « Complexe Segmentaire Inter Points » (figure 25). Nous conserverons au long de cette étude les mêmes codes de teintes et de niveau de gris.

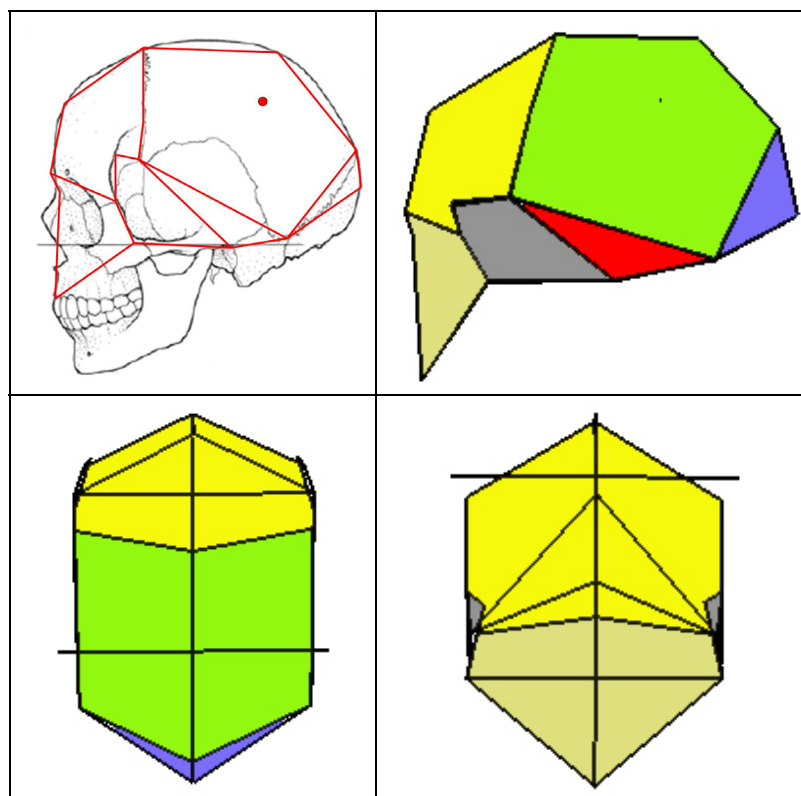


Figure 25 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques.

Aucun point de repère craniométrique de la base du crâne ou du palais n'a été sélectionné dans cette modélisation, ceci en raison de la mauvaise conservation de ces zones chez un grand nombre de fossiles d'Hominidés étudiés.

Nous regroupons dans le tableau 4 la liste des individus utilisés au cours de cette modélisation tridimensionnelle du crâne. Pour cette modélisation, comme pour les autres, nous avons choisi de définir arbitrairement une attribution phylétique pour les individus faisant l'objet de discussions phylétiques. Cette étape intermédiaire est nécessaire pour effectuer les analyses. L'attribution phylétique de ces fossiles sera rediscutée par la suite.

Tableau 4 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques.

Hominidés du Pléistocène inférieur	3	-KNM ER 1470 [<i>Homo rudolfensis</i>] -KNM ER 3733 [<i>Homo ergaster</i>] -D2282 [<i>Homo georgicus</i>]
Hominidés du Pléistocène moyen d'Europe et d'Afrique	6	-Arago 21-47 (1981) [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Arago3D [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Kabwe [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Petralona [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Sima de los Huesos 5 [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Biache-Saint-Vaast 2 [<i>Homo heidelbergensis</i>]
Hominidé du Pléistocène moyen d'Asie	1	-Sangiran 17 [<i>Homo erectus</i> asiatique]
Hominidés du Pléistocène supérieur d'Europe et du Moyen-Orient	15	-Amud 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Chapelle-aux-Saints [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Ferrassie 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Quina H18 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Monte Circeo 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Teshik Tash [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Chancelade 1 [<i>Homo sapiens</i>] -Cro-Magnon 1 [<i>Homo sapiens</i>] -Hotu Cave 2 [<i>Homo sapiens</i>] -Markina Gora [<i>Homo sapiens</i>] -Obercassel 2 [<i>Homo sapiens</i>] -Pataud [<i>Homo sapiens</i>] -Predmost III [<i>Homo sapiens</i>] -Qafzeh 9 [<i>Homo sapiens</i>] -Skhul 5 [<i>Homo sapiens</i>]
<i>Homo sapiens</i> historiques	74	Annexe 1: A.2.1
<i>Australopithecus africanus</i>	2	-Sts5 -Sts71
<i>Paranthropus boisei</i>	2	-KNM ER 406 -OH5
Gorilles	7	-Gorille -Gorille 5 sec -Gorille sp moulage -Gorille moulage WG -Gorille CMNH -Gorille moulage marron -Gorille n° E3
Chimpanzés	4	-Pan Lab Anat Comp 1978-6 -Pan troglodytes femelle -Pan troglodytes male -Longchamps
Total	114	

III.2.2.3 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques

En raison de l'absence du prosthion et de la face sur de nombreux fossiles (calvaria d'*Homo erectus*) nous n'avons plus utilisé ces points dans les modélisations avec 21 et 19 points. Pour inclure des restes fossiles comme la calotte crânienne de l'Homme de Neandertal, nous avons choisi dans le modèle à 19 points de ne pas tenir compte du porion.

Dans le tableau 5 listant les points de repères utilisés le gris indique les points de repères supprimés en plus pour le modèle à 19 points. Nous présentons en figure 26 le Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation en 21 points.

Tableau 5 : Points de repères craniométriques utilisés lors de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points.

Astérion (2)	Bosse pariétale (2)	Bregma	Fronto-malaire temporal (2)
Fronto-temporal (2)	Glabelle	Lambda	Métopion
Nasion	Opisthocranion	Porion (2)	Sagittum
Sphénion (2)		Stéphanion (2)	

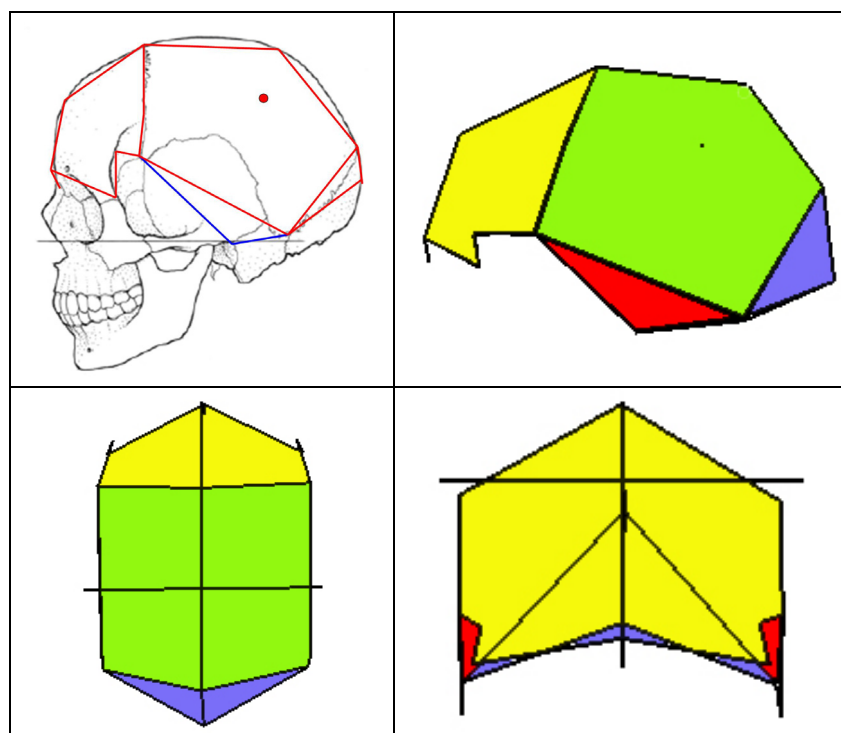


Figure 26 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques.

Nous regroupons dans le tableau 6 la liste des crânes utilisés au cours des deux modélisations avec ceux de base pour 21 points et en souligné ceux rajoutés pour le modèle à 19 points.

Tableau 6 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques (19 points uniquement).

Hominidés du Pléistocène inférieur d'Europe et d'Afrique	9	-D2280 [<i>Homo georgicus</i>] -D2282 [<i>Homo georgicus</i>] -KNM ER 1470 [<i>Homo rudolfensis</i>] -KNM ER 1813 [<i>Homo habilis</i>] -KNM ER 3733 [<i>Homo ergaster</i>]	-KNM ER 3883 [<i>Homo ergaster</i>] -KNM WT 15000 [<i>Homo ergaster</i>] -OH9 [<i>H. erectus</i> africain] -Ceprano [<i>Homo cepranensis</i>]
Hominidés du Pléistocène moyen d'Europe et d'Afrique	6	-Arago 21-47 (1981) [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Arago3D [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Biache-Saint-Vaast 2 [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Kabwe [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Petalona [<i>Homo heidelbergensis</i>] -Sima de los Huesos 5 [<i>Homo heidelbergensis</i>]	
Hominidés du Pléistocène moyen et supérieur d'Asie	10	-Zhoukoudian III [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Zhoukoudian XI [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Zhoukoudian XII [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Dali [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Hexian [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Ngawi 1 [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Sambungmacan 3 [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Sangiran 17 [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Ngandong 6 [<i>Homo erectus</i> asiatique] -Ngandong 7 [<i>Homo erectus</i> asiatique]	
Hominidés du Pléistocène supérieur d'Europe et du Moyen-Orient	19 (21)	-Amud 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Chapelle-aux-Saints [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Ferrassie 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Quina H5 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -La Quina H18 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Monte Circeo 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Neanderthal 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Saccopastore 1 [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Teshik Tash [<i>Homo neanderthalensis</i>] -Chancelade 1 [<i>Homo sapiens</i>] -Cro-Magnon 1 [<i>Homo sapiens</i>] -Cro-Magnon 3 [<i>Homo sapiens</i>] -Hotu Cave 2 [<i>Homo sapiens</i>] -Jebel Irhoud1 [<i>Homo sapiens</i>] -Markina Gora [<i>Homo sapiens</i>] -Mladec V [<i>Homo sapiens</i>] -Obercassel 2 [<i>Homo sapiens</i>] -Pataud [<i>Homo sapiens</i>] -Predmost III [<i>Homo sapiens</i>] -Qafzeh 9 [<i>Homo sapiens</i>] -Skhul 5 [<i>Homo sapiens</i>]	
<i>Homo sapiens</i> historiques	106	Annexe 1: A.2.2	
<i>Australopithecus africanus</i>	2	-Sts5 -Sts71	
<i>Paranthropus boisei</i>	4	-KNM ER 406 -KNM ER 13750	-KNM ER 23000 -OH5
Gorilles	7	-Gorille -Gorille 5 sec -Gorille sp moulage -Gorille moulage WG	-Gorille CMNH -Gorille moulage marron -Gorille n° E3
Chimpanzés	4	-Pan Lab Anat Comp 1978-6 -Pan troglodytes femelle	-Pan troglodytes male -Longchamps
Total	167 (169)		

Après avoir modélisé tridimensionnellement la calotte crânienne, nous avons décidé d'étudier des os crâniens de manière isolée, hors de tout contexte anatomique, pour inclure une série de fossiles fragmentaires. Les résultats de ces modélisations tridimensionnelles seront comparés à ceux des analyses crâniennes plus complètes. Nous avons choisi deux portions de la voûte crânienne : l'os frontal et la voûte bipariétale.

III.2.2.4 Modélisation tridimensionnelle de l'écaille frontale

En raison de sa position charnière entre la face et le neurocrâne, le frontal est un os important dans la compréhension de la dynamique crânienne. Sa modification implique un changement de la largeur et de la forme de la face ainsi qu'une évolution de la longueur du crâne.

Le choix des points de repères a été effectué suite à une comparaison d'os frontaux fossiles (GUIPERT *et al.*, sous presse). Nous avons ainsi retenu une série de points pertinents pour la modélisation de l'os frontal (tableau 7) et ignoré certains points précédemment étudiés afin de pouvoir maximiser l'échantillon d'étude.

Nous avons pris dans le plan sagittal les points de repères suivants : bregma, métopion, glabelle, nasion, ainsi que le point supraglabellaire qui permet de lier l'écaille frontale cérébrale et la portion orbitaire. Les arcades orbitaires frontales n'ont pas été modélisées totalement en raison de leur fragilité sur de nombreux fossiles. Nous avons donc procédé à la modélisation de la largeur de la zone frontale antérieure grâce au nasion et aux points fronto-malaires orbitaires temporaux. Les limites de la facette temporale du frontal sont établies via le point fronto-malaire temporal, le point fronto-temporal, le stéphanion et le sphénion. Ces deux derniers points, permettent avec le bregma de délimiter la suture coronale.

Tableau 7 : Points de repères craniométriques utilisés lors de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal.

Bregma	Métopion	Point Supraglabellaire	Glabelle
Nasion	Fronto-malaire temporal (2)	Fronto-temporal (2)	Sphénion (2)
Stéphanion (2)			

Des points de repères craniométriques comme le sommet des bosses frontales n'ont pas été retenus en raison de la difficulté de localiser précisément ces points sur les écailles fossiles. L'utilisation d'autres points dans le plan sagittal n'apporte aucune information pertinente.

Lors de la modélisation des Complexes Segmentaires Inter Points de l'os frontal (figure 27), l'utilisation de segments entre les points fronto-malaires temporaux et le nasion, la glabella et le point supraglabellaire nous paraît nécessaire pour délimiter les zones supraorbitaire et orbitaire frontales. La modélisation a nécessité au total 13 points de repères craniométriques.

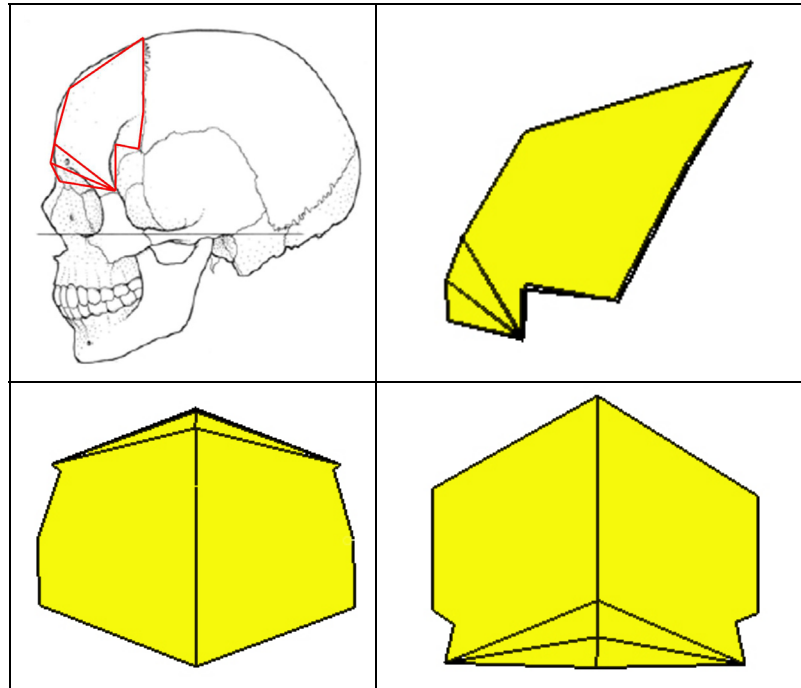


Figure 27 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal avec 13 points de repères craniométriques.

Nous regroupons dans le tableau 8 la liste des os frontaux considérés de manière isolée.

Tableau 8 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal.

Hominidés du Pléistocène inférieur d'Europe et d'Afrique	9	-KNM ER 1470 [<i>H. rudolfensis</i>] -KNM ER 1813 [<i>H. habilis</i>] -KNM ER 3733 [<i>H. ergaster</i>] -KNM ER 3883 [<i>H. ergaster</i>] -KNM WT 15000 [<i>H. ergaster</i>]	-D2280 [<i>H. georgicus</i>] -D2282 [<i>H. georgicus</i>] -OH9 [<i>H. erectus</i> africain] -Ceprano [<i>H. cepranensis</i>]
Hominidés du Pléistocène moyen d'Europe et d'Afrique	7	-Arago21-47(1981)[<i>H. heidelbergensis</i>] -Arago3D [<i>H. heidelbergensis</i>] -BSV 2 [<i>H. heidelbergensis</i>] -Bodo 1 [<i>H. heidelbergensis</i>]	-Kabwe [<i>H. heidelbergensis</i>] -Petalona [<i>H. heidelbergensis</i>] -Sima de los Huesos 5 [<i>H. heidelbergensis</i>]
Hominidés du Pléistocène moyen et supérieur d'Asie	10	-Zhoukoudian III [<i>H. erectus</i>] -Zhoukoudian XI [<i>H. erectus</i>] -Zhoukoudian XII [<i>H. erectus</i>] -Dali [<i>H. erectus</i>] -Hexian [<i>H. erectus</i>]	-Ngawi 1 [<i>H. erectus</i>] -Sambungmacan 3 [<i>H. erectus</i>] -Sangiran 17 [<i>H. erectus</i>] -Ngandong 6 [<i>H. erectus</i>] -Ngandong 7 [<i>H. erectus</i>]
Hominidés du Pléistocène supérieur d'Europe et du Moyen-Orient	25	-Amud 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Engis 2 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Gibraltar 2 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Krapina 3 [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Chapelle-aux-Saints [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Ferrassie 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Quina H5 [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Quina H18 [<i>H. neanderthalensis</i>] -MonteCirceo1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Neanderthal 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Saccopastore1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Teshik Tash [<i>H. neanderthalensis</i>]	-Chancelade 1 [<i>H. sapiens</i>] -Cro-Magnon 1 [<i>H. sapiens</i>] -Cro-Magnon 3 [<i>H. sapiens</i>] -Hotu Cave 2 [<i>H. sapiens</i>] -Jebel Irhoud1 [<i>H. sapiens</i>] -Markina Gora [<i>H. sapiens</i>] -Mladec V [<i>H. sapiens</i>] -Zuttiyeh 1 [<i>H. sapiens</i>] -Obercassel 2 [<i>H. sapiens</i>] -Pataud [<i>H. sapiens</i>] -Predmost III [<i>H. sapiens</i>] -Qafzeh 9 [<i>H. sapiens</i>] -Skhul 5 [<i>H. sapiens</i>]
<i>Homo sapiens</i> historiques	123	Annexe 1 : A.2.3	
<i>Australopithecus africanus</i>	2	-Sts5 -Sts71	
<i>Paranthropus boisei</i>	4	-KNM ER 406 -KNM ER 13750	-KNM ER 23000 -OH5
Gorilles	7	-Gorille -Gorille 5 sec -Gorille sp moulage -Gorille moulage WG	-Gorille CMNH -Gorille moulage marron -Gorille n° E3
Chimpanzés	4	-Pan Lab Anat Comp 1978-6 -Pan troglodytes femelle	-Pan troglodytes male -Longchamps
Total	191		

III.2.2.5 Modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit

Après l'os frontal, nous avons modélisé l'os pariétal droit pour deux raisons : 1/ L'os pariétal est de part sa forme et son épaisseur l'un des os crâniens le plus souvent conservé parmi les Hominidés fossiles auxquels nous avons accès ; 2/ La reconstitution du crâne Arago 21-47 nécessite une reconstruction de l'os pariétal droit.

En plus de l'os pariétal isolé, nous avons modélisé la voûte bipariétale pour comparer les rapports angulaires entre les deux os pariétaux au sein des espèces considérées. Seuls les points de repères craniométriques correspondant au bord sagittal et au pariétal droit sont communs aux deux modélisations (tableau 9, figure 28).

Tableau 9 : Points de repères craniométriques utilisés dans la modélisation de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé.

Astérion (2)	Bosse pariétale (2)	Bregma	Incisure pariétale
Kroptaphion	Lambda	Sagittum	Sphénion (2)
Stéphanion (2)			

Le contour sagittal est délimité par le bregma, le sagittum et le lambda. Le bord occipital (suture lambdatique) n'est constitué que du lambda et de l'astérion. Nous n'avons pas pris de point intermédiaire. Le bord coronal est constitué du bregma, du stéphanion et du sphénion. Ces trois points permettent de modéliser la courbure de l'os pariétal en vue frontale. Le choix des points pour le bord inférieur a été plus difficile. En effet, le bord inférieur du pariétal est recouvert en biseau par l'écaille temporale. Nous pensions sélectionner le point le plus élevé de l'écaille temporale, mais pour de nombreux spécimens fossiles et historiques, cette écaille s'avérait altérée, fracturée avec perte de ce point. Le choix de ce point ne donne pas les limites inférieures de l'os pariétal, mais celles supérieures de l'os temporal qui le recouvre. Dernière remarque : un tel point ne peut être défini sur un os pariétal isolé. Nous avons donc défini un contour inférieur moyen en sélectionnant, en plus du sphénion et de l'astérion, le kroptaphion et le point d'incisure pariétale.

Au total, la modélisation de l'os pariétal est réalisée au moyen de 9 points et la voûte bipariétale avec 15 points de repères craniométriques.

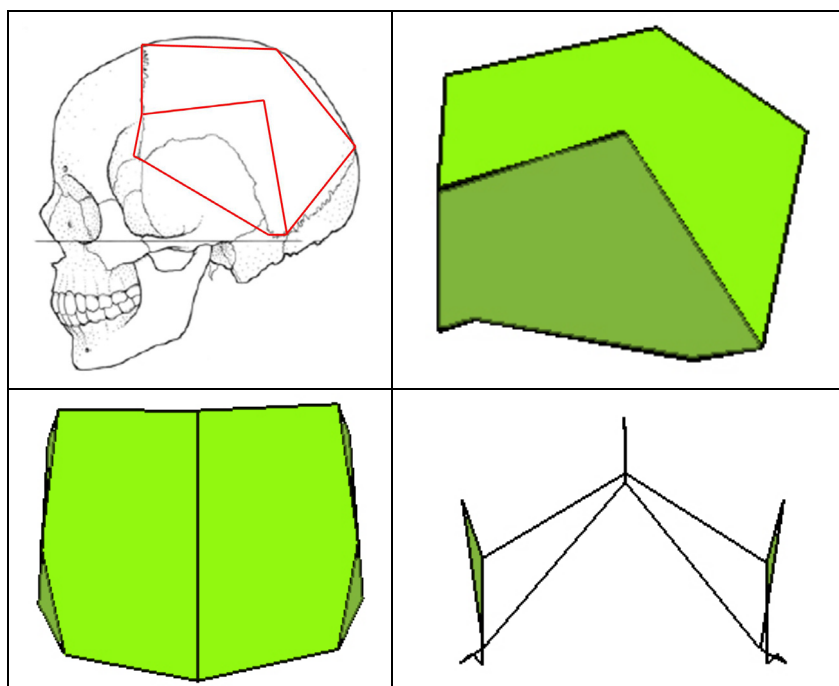


Figure 28 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation de la voûte bipariétale avec 15 points de repères craniométriques.

Le tableau 10 regroupe la liste des spécimens utilisés pour la modélisation de la voûte bipariétale et ceux utilisés uniquement pour la modélisation tridimensionnelle des os pariétaux droits isolés (en souligné).

Tableau 10 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé (pariétal droit uniquement).

Hominidés du Pléistocène inférieur d'Europe et d'Afrique	10	-KNM ER 1470 [<i>H. rudolfensis</i>] -KNM ER 1813 [<i>H. habilis</i>] -OH7 [<i>H. habilis</i>] -KNM ER 3733 [<i>H. ergaster</i>] -KNM ER 3883 [<i>H. ergaster</i>]	-KNM WT 15000 [<i>H. ergaster</i>] -D2280 [<i>H. georgicus</i>] -D2282 [<i>H. georgicus</i>] -OH9 [<i>H. erectus</i> africain] -Ceprano [<i>H. cepranensis</i>]
Hominidés du Pléistocène moyen d'Europe et d'Afrique	9 (10)	-Arago 21-47 (1981) [<i>H. heidelbergensis</i>] -Arago3D [<i>H. heidelbergensis</i>] -BSV 2 [<i>H. heidelbergensis</i>] -Kabwe [<i>H. heidelbergensis</i>] -Elandsfontein [<i>H. heidelbergensis</i>]	-Petalona [<i>H. heidelbergensis</i>]-Sale [<i>H. heidelbergensis</i>] -Sima de los Huesos 5 [<i>H. heidelbergensis</i>] -Swanscombe [<i>H. heidelbergensis</i>] -Ternifine 4 [<i>H. heidelbergensis</i>]
Hominidés du Pléistocène moyen et supérieur d'Asie	17 (19)	-Zhoukoudian III [<i>H. erectus</i>] -Zhoukoudian XI [<i>H. erectus</i>] -Zhoukoudian XII [<i>H. erectus</i>] -Dali [<i>H. erectus</i>] -Hexian [<i>H. erectus</i>] -Narmada [<i>H. erectus</i>] -Ngawi 1 [<i>H. erectus</i>] -Sambungmacan 1 [<i>H. erectus</i>] -Sambungmacan 3 [<i>H. erectus</i>] -Sangiran 2 [<i>H. erectus</i>]	-Sangiran 3 [<i>H. erectus</i>] -Sangiran 10 [<i>H. erectus</i>] -Sangiran 17 [<i>H. erectus</i>] -Sangiran 38 [<i>H. erectus</i>] -Ngandong 5 [<i>H. erectus</i>] -Ngandong 6 [<i>H. erectus</i>] -Ngandong 7 [<i>H. erectus</i>] -Ngandong 9 [<i>H. erectus</i>] -Trinil 2 [<i>H. erectus</i>]
Hominidés du Pléistocène supérieur d'Europe et du Moyen-Orient	24 (25)	-Amud 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Cova Negra [<i>H. neanderthalensis</i>] -Engis 2 [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Chapelle-aux-Saints [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Ferrassie 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Quina H5 [<i>H. neanderthalensis</i>] -La Quina H18 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Monte Circeo 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Neanderthal 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Saccopastore 1 [<i>H. neanderthalensis</i>] -Teshik Tash [<i>H. neanderthalensis</i>] -Chancelade 1 [<i>H. sapiens</i>]	-Cro-Magnon 1 [<i>H. sapiens</i>] -Cro-Magnon 2 [<i>H. sapiens</i>] -Cro-Magnon 3 [<i>H. sapiens</i>] -Hotu Cave 2 [<i>H. sapiens</i>] -Jebel Irhoud1 [<i>H. sapiens</i>] -LH18 [<i>H. sapiens</i>] -Markina Gora [<i>H. sapiens</i>] -Mladec V [<i>H. sapiens</i>] -Obercassel 2 [<i>H. sapiens</i>] -Pataud [<i>H. sapiens</i>] -Predmost III [<i>H. sapiens</i>] -Qafzeh 9 [<i>H. sapiens</i>] -Skhul 5 [<i>H. sapiens</i>]
<i>Homo sapiens</i> historiques	109	Annexe 1: A.2.4	
<i>Australopithecus africanus</i>	2	-Sts5 -Sts71	
<i>Paranthropus aethiopicus</i>	1	-KNM WT 17000	
<i>Paranthropus boisei</i>	4 (5)	-KNM ER 406 -KNM ER 13750 -KNM ER 23000	-OH5 -Omo Membre EL 338y
Gorilles	7	-Gorille -Gorille 5 sec -Gorille sp moulage -Gorille moulage WG	-Gorille CMNH -Gorille moulage marron -Gorille n° E3
Chimpanzés	4	-Pan Lab Anat Comp 1978-6 -Pan troglodytes femelle	-Pan troglodytes male -Longchamps
Total	187 (192)		

III.2.2.6 Symétrisation

Nous avons réalisé différentes modélisations du crâne et de la calotte crânienne en allant d'une forme relativement complexe en premier lieu à une forme plus simplifiée mais comportant plus de points. Pour accroître les effectifs nous avons calculé la position des points de repères lorsque le spécimen était fracturé.

Nous avons, pour les crânes symétriques ou non déformés, procédé à la symétrisation des points existants. Nous avons élaboré et utilisé une formule de calcul sous le logiciel Excel. Le choix du logiciel s'est fait au détriment d'un programme en C ou C++ en raison de l'enregistrement initial des données MicroScribe sous ce format. La formule permet de calculer la localisation spatiale du point absent, à partir des coordonnées tridimensionnelles des trois points servant de plan de symétrisation et du point source.

Nous avons établi quelques restrictions à l'usage de cet outil mathématique :

- Comme précisé ci-dessus, la symétrisation n'a pas eu lieu pour les crânes manifestement très déformés (sauf dans le cas des reconstructions virtuelles)..
- La symétrisation a été limitée à deux points pour chaque coté (sauf dans le cas des reconstructions virtuelles).
- La symétrisation n'a eu lieu que lorsque les points de repères sagittaux se trouvaient assez distants (distance supérieure à 20 mm, valeur choisie après essais). Des points trop proches donnent une symétrisation aberrante.

Après chaque symétrisation, le crâne était modélisé afin de vérifier si le point obtenu était cohérent.

Les points sagittaux absents n'ont été déterminés que lorsqu'une reconstruction était possible. Les crânes nécessitant des approximations sagittales ainsi que des symétrisations ont été écartés (sauf dans le cas des reconstructions virtuelles).

III.2.3 Normalité de la population de référence

Nous n'avons testé que la normalité des individus historiques de Notre-Dame-du-Bourg (faibles effectifs des autres populations) suivant diverses valeurs morphométriques :

- Corde bregma – lambda (B-La)
- Largeur bistéphanique (St-St)
- Largeur bisphénique (Sphn-Sphn)
- Largeur frontale minimale (fronto-temporale ; Ft-Ft)
- Largeur bijugale (Ju-Ju)
- Largeur biastérique (As-As)

- Corde nasion – lambda (Na-La)
- Corde nasion – opisthocranion (Na-Op)

Nous avons utilisé le logiciel Statgraphic®Plus 5.0. Le seuil de risque choisi est de 0,05. Les résultats sont présentés en Annexe 3.

III.2.4 Méthodes Procrustes et ACP

III.2.4.1 Principe des Analyses Procrustes

Procruste, Procuste ou Prokroustés, était selon les légendes un brigand grec qui attachait les voyageurs sur un lit et leur coupait ou étirait les jambes afin que leur taille corresponde à celle du lit (HOWATSON, 1993). On donne depuis comme sens à ce terme « celui qui étire ». Les méthodes de superimpositions Procrustes reprennent ce procédé. L'approche géométrique de la forme permet le traitement indépendant des conformations (shape) et du paramètre de taille (size), quel que soit le nombre d'individus considérés (deux ou plus).

Les structures à comparer sont alignées suivant leur centre de gravité par une translation (figure 29). Puis, ces structures sont mises à la même échelle. Ce processus de normalisation permet de travailler à taille isométrique et de traiter ce paramètre en tant que variable indépendante (Centroïd Size ou CSI). La dernière opération consiste à ajuster les individus par une rotation.

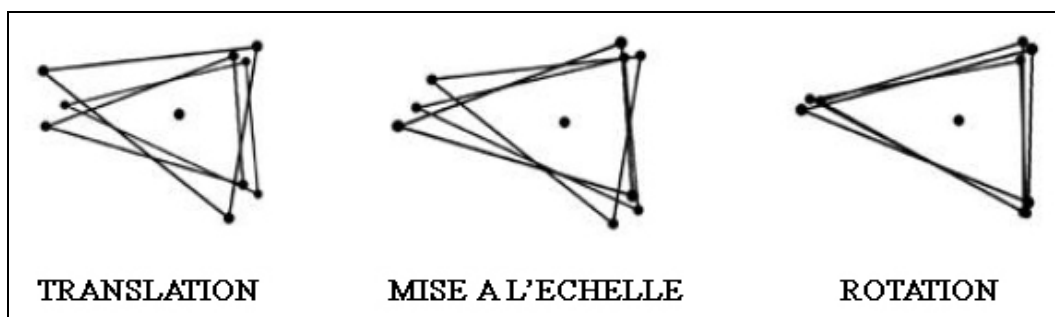


Figure 29 : Différentes étapes de la superimposition Procruste (d'après Bruner, 2003).

En procédant à l'alignement généralisé suivant les moindres carrés (GLS, Generalized Least-Squares), l'ajustement répartit l'ensemble des déformations sur la totalité des points homologues considérés.

Le choix des points, de type I à III (BOOKSTEIN, 1991), de leur nombre et du nombre d'individu, influent sur la représentation de la variabilité au sein de l'échantillonnage, et ainsi sur les comparaisons inter- et intra-groupes.

III.2.4.2 Analyse en composante principale (ACP)

La superimposition des individus ne suffit ni à décrire les allomorphoses (changements de conformation), ni les allométries (changements de taille) au cours de la croissance. Nous obtenons un individu consensuel, moyenne des autres. Pour exprimer la variabilité de l'échantillon et pouvoir l'étudier, il convient de traiter les résultats de la superimposition (résidus Procrustes) par une Analyse en Composante Principale, analyse statistique multivariée.

Principes

L'Analyse en composante principale a pour objet de décrire les informations contenues dans une matrice des données qui se compose de lignes d'individus (fossiles) et de colonnes de variables quantitatives (longueur, largeur, épaisseur).

L'ACP peut être faite sur des données brutes ou sur des données réduites. Elle permet de représenter géométriquement des individus et des caractères par une réduction de ceux-ci. Les caractères principaux doivent être indépendants (coefficient de corrélation nuls) et complémentaires au sens de l'information.

L'ACP est une méthode factorielle. La réduction du nombre de caractères se fait par une construction de nouveaux caractères obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen de facteurs. C'est une méthode linéaire traitant des caractères numériques pour obtenir une représentation d'un nuage $N(I)$ des individus dans un espace de dimension réduite. Il faut déterminer les axes factoriels prenant le mieux en compte la dispersion des points du nuage. On obtient une représentation plane du nuage en projetant orthogonalement au sens de la métrique M tous les points sur le plan principal d'inertie (espace 2D).

L'espace des individus est représenté par des vecteurs, où chacun des individus est un vecteur. La distance entre deux individus est appelée "métrique".

L'inertie totale du nuage de points est la moyenne pondérée des carrés des distances des n points au centre de gravité. Cette quantité mesure l'éloignement des points par rapport à leur centre de gravité, c'est-à-dire la dispersion globale du nuage (inertie nulle = individus identiques).

L'espace des caractères est représenté aussi par des vecteurs, chaque caractère étant un vecteur. La métrique choisie est une matrice diagonale car : le produit scalaire de deux caractères est la covariance ; la longueur d'un caractère est égale à son écart type ; le cosinus de l'angle entre deux caractères est le coefficient de corrélation linéaire.

Les axes et les facteurs principaux v_1, v_2, \dots, v_n (dans le cas simplifié où M est la matrice Identité) sont les vecteurs propres de la matrice associée aux valeurs propres. Le nombre de valeurs propres non nulles (car sinon il y a une relation linéaire entre les caractères initiaux) donne la dimension de l'espace dans lequel sont réellement faites les observations. Les composantes principales sont définies par les variables C . Les variances d'une composante principale sont les valeurs propres. L'ACP remplace les p caractères initiaux par des caractères non corrélés de variance maximale et d'importance décroissante. Les premières composantes principales C sont les combinaisons linéaires des variables centrées et réduites ayant une variance maximale.

Résultats

Afin de donner une signification aux résultats, on considère les corrélations et les individus typiques. On repère aisément les caractères liés entre eux ou opposés. L'ACP construit des représentations graphiques permettant de visualiser des relations entre variables ainsi que l'existence éventuelle de groupes d'individus et de groupes de variables.

- Les corrélations sont synthétisées dans un cercle imaginaire à deux axes ou plus. Chaque axe représente une composante principale. On regarde la position des variables par rapport à cet axe.
- Si les variables sont proches de la direction positive de l'axe alors elles sont corrélées, si les variables sont proches de la direction négative de l'axe elles sont alors anti-corrélées,
- Si les variables sont proches d'un autre axe, alors elles sont non corrélées,
- On ne peut comparer des points entre eux que s'ils sont proches de la circonférence du cercle, par contre on ne peut rien dire quand les variables sont agglomérées au centre du cercle, ou de la sphère unité.

Chaque composante décrit la variance maximum de l'échantillon qui exprime sur les résidus Procustes la relation d'allomorphose contenue dans l'échantillon. Les composantes principales (plus haut pourcentage) sont appelées composantes ou vecteurs de conformation, décrivant les mouvements de l'ensemble des points.

Si une régression de la taille, devenue paramètre indépendant après normalisation, est réalisée sur les vecteurs de conformation, les changements ainsi visualisés, peuvent être interprétés en terme d'allométries de croissance.

Chaque composante analysée permet d'expliquer une partie de la variance générale de la population. Selon son poids, il est alors possible de dire si le caractère analysé joue ou non un rôle dans la morphologie étudiée.

III.2.5 Les logiciels de modélisation virtuelle et d'analyse tridimensionnelle

Dans le cadre du DESS Compétence Complémentaire en Informatique dirigé par le Professeur J. Sequeira, nous avons procédé à la modélisation virtuelle de crânes d'Hominidés. Nous avons co-développé une interface graphique (GUI) afin de modéliser des crânes sous Matlab 6.5. Cette interface ne s'étant pas avérée idéale, nous avons utilisé le software Yav++ dans le cadre du mémoire de DESS (GUIPERT, 2003) et du Projet FOVEA (GUIPERT *et al.*, 2003, 2004). D'autres programmes informatiques ont été utilisés afin de procéder à la reconstruction du crâne Arago 21-47.

III.2.5.1 Yav++

Le software Yav++ ou « **Yet Another Viewer** » est une plateforme générique pour la visualisation et le travail d'images médicales volumétriques. Il a été développé à Sophia-Antipolis (Nice, France) par une équipe de chercheurs INRIA dirigée par Hervé Delingette, dans le cadre du projet Epidaure. Il a été conçu et programmé de manière à utiliser C++, Tcl/Tk et OpenGL aussi bien pour les visualisations que pour les algorithmes. Le software est ouvert, l'utilisateur accédant à une interface Tk et des scripts Tcl, tandis que le développeur peut créer des bibliothèques et ajouter des fonctionnalités via des modules en C++. Nous avons utilisé la version 1.8 sous interface Windows XP.

YAV++, qui utilise son propre format d'image, nécessite de concaténer des coupes scanners en une seule grâce à un programme `makeInrimage.pl` développé avec G. Subsol. Ce programme nécessite cinq paramètres : `halfXY`, `stepZ`, `pixelSpacing`, `sliceThickness`, `rank1`, `rank2`.

`halfXY` correspond au nombre désiré de division de l'image en X et Y. La valeur 1 fera passer l'image de 512*512 en 256*256, 2 en 128*128...

`stepZ` indique que le programme ne concatène les coupes que tous les Z. La valeur 1 veut dire que les images sont en continu.

`pixelSpacing` (espace entre les pixels) et `sliceThickness` (épaisseur des coupes) correspondent à des valeurs présentes dans le header.

`rank1` et `rank2` indiquent respectivement la position de la première et de la dernière image à prendre en compte lors de la concaténation.

Une fois les données concaténées en un seul fichier propre à YAV++, nous utilisons ce software pour obtenir une modélisation volumique sur laquelle nous relevons les coordonnées spatiales des différents points de repères (option de sélection des vertex). Les coordonnées ont été notées et enregistrées sous fichiers .txt et sous Excel.

Les manipulations et modifications tridimensionnelles (symétrisations, compensations des déformations) ont été réalisées au moyen des deux logiciels suivants.

III.2.5.2 Mimics 8.0

Nous avons utilisé sous WindowsXP la version 8.0 du logiciel développé par la société Materialise©. « Materialise's Interactive Medical Image Control System » est un logiciel de traitement d'images tridimensionnelles. Il permet de modéliser des objets à partir de coupes scanners. Le logiciel présente des séries d'options telles que le seuillage, la symétrisation, la possibilité de mesurer virtuellement les distances. Les travaux réalisés sous cette interface sont ensuite exportables sous différents formats dont Stl pour le prototypage.

III.2.5.3 RapidForm™2004

Nous avons utilisé le logiciel RapidForm™2004 produit par la société INUS Technology. Ce logiciel permet de travailler sur des fichiers Stl en vue d'un prototypage (stéréolithographie). Parmi les différentes options proposées par le logiciel, nous avons surtout utilisé les fonctions de symétrisation, de découpage, d'union de fragments ainsi que la déformation libre de polygone.

III.2.5.4 Morphologika

III.2.5.4.1 Format

Ce logiciel freeware a été réalisé par Paul O'Higgins et Nicholas Jones© (2004) dans le cadre du groupe de recherche « the Functional Morphology & Evolution », de la « Hull York Medical School or the University of York ». Il s'agit d'un ensemble d'outils intégrés pour examiner les variations de taille et de forme d'objets décrits par une série de coordonnées bi- ou tridimensionnelles.

Le fichier de base s'enregistre sous format .txt et est relativement simple et rapide à rédiger (tableau 11).

Tableau 11 : Format d'un fichier au format Morphologika.

[individuals]
Nombre d'individus
[landmarks]
Nombre de points de repères
[Dimensions]
Nombre de dimensions
[Groups]
Possibilité de créer des groupes en indiquant le nombre d'individus correspondants
[names]
Noms des individus
[labels]
Informations supplémentaires (ex: sexe)
[labelvalues]
Valeurs des informations (ex : femme)
[rawpoints]
#1
Coordonnées x y z du premier point du premier individu
[wireframe]
Couple de points de repères à relier par fil de fer

Nous avons réalisé des fichiers contenant près de 4000 lignes de coordonnées tridimensionnelles et informations diverses (référence, sexe, âge). La plupart des données ont été entrées manuellement. Les coordonnées proviennent de points de repères relevés soit sur les reconstitutions virtuelles de crânes numérisés par tomodensitométrie à rayons X, soit au moyen du digitaliseur portable MicroScribe®3DX.

Après avoir sélectionné le fichier source de données, il est possible de choisir des groupes, des individus ou des points de repères craniométriques à ignorer lors de l'analyse. Le logiciel localise dans l'espace les coordonnées spatiales contenues dans le fichier pour chaque individu (figure 30). Cette étape ne générant que des nuages de points non alignés suivant le même axe, il est nécessaire de procéder au recadrage des données (Superimposition Procruste).

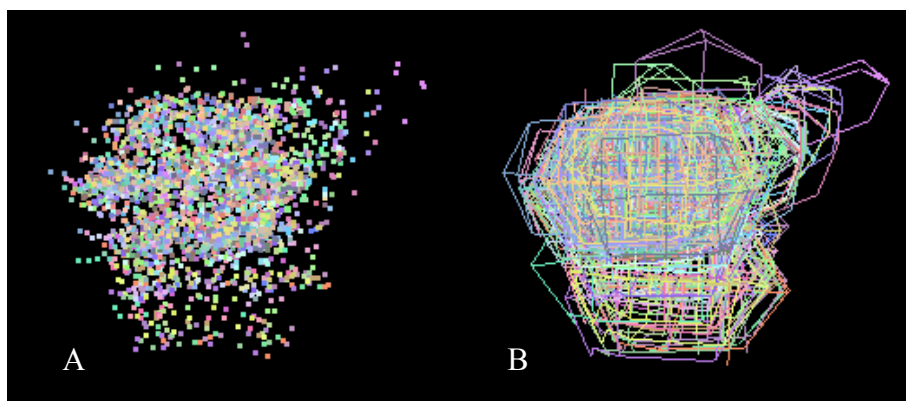


Figure 30 : A : Points de repères craniométriques ; B : Complexe Segmentaires Inter Points.

III.2.5.4.2 Analyse Procuste

Les différents spécimens sélectionnés pour la superimposition Procuste sont réorientés suivant les principes exposés plus haut. Tous les individus sont alors modélisés dans la même fenêtre graphique (figure 31).

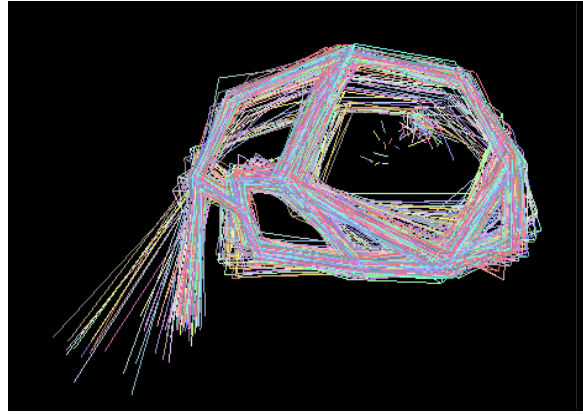


Figure 31 : Superposition Procuste de Complexes Segmentaires Inter Points.

Les informations obtenues ne sont pas encore exploitables directement et nécessitent une Analyse en Composantes Principales.

III.2.5.4.3 ACP

Morphologika permet de réaliser une analyse Procuste et de procéder à son Analyse en Composantes Principales. L'analyse se fait par tableau croisé des données. L'Analyse en Composante Principale d'individus avec k points de repères dans m dimensions se fait avec $k \cdot m - m(m-1)/2$ vecteurs propres. Les vecteurs propres sont utilisés dans Morphologika pour calculer les moyennes «morphées» qui permettent la visualisation de la variabilité de structure représentées par chaque Composante Principale.

Le degré de variance relevé pour chaque Composante Principale est disponible pour interprétation par l'utilisateur (figure 32). Le programme indique le poids relatif de chaque composante par rapport aux autres, puis il est possible de consulter la valeur de chaque composante pour chaque individu.

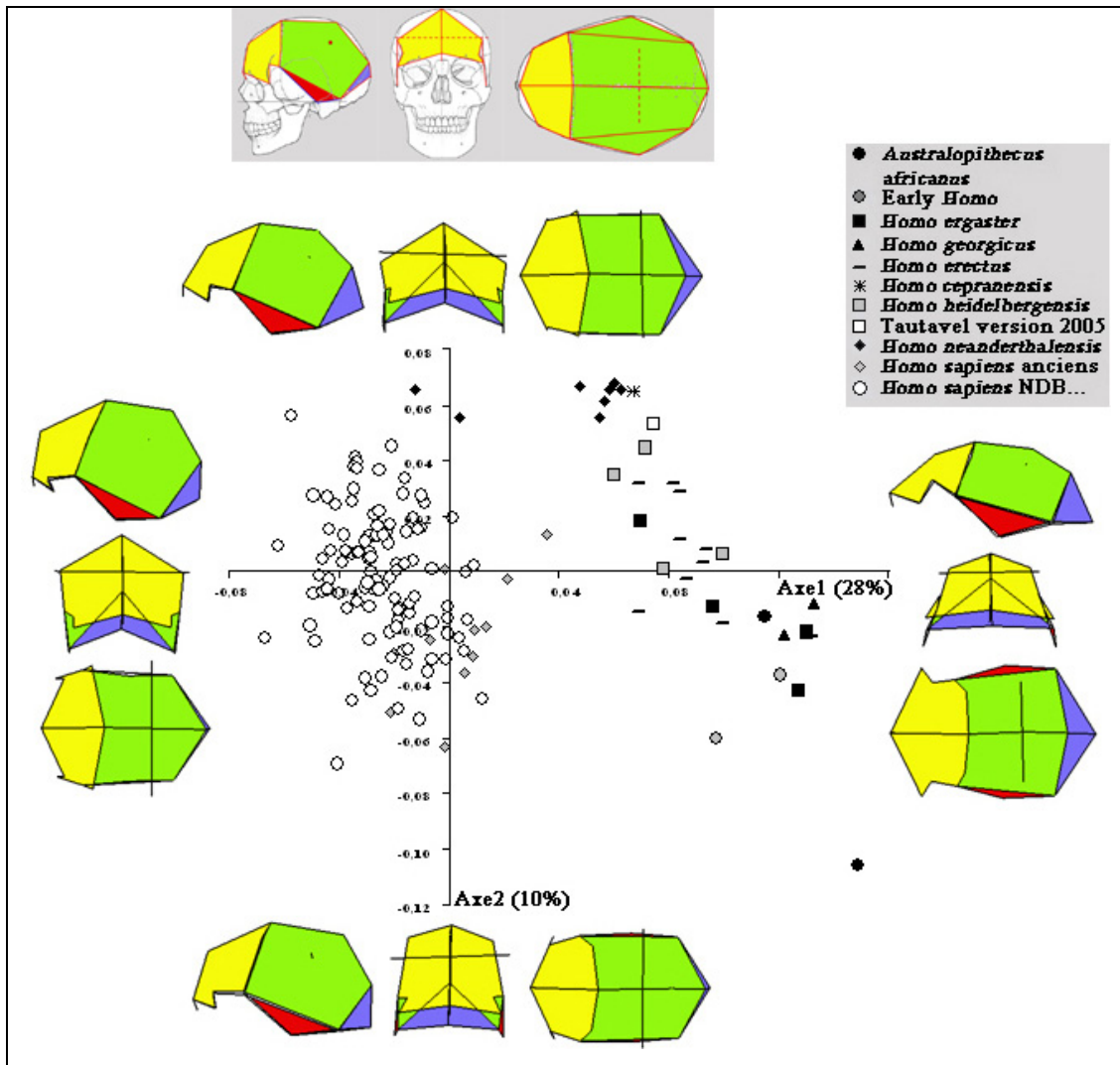


Figure 32 : Exemple d'Analyse en Composantes Principales ; Modélisation de la calotte crânienne au moyen de 21 points de repères craniométriques.

La première composante (figure 32) explique 28% de la variance totale des individus contre 10% pour la seconde.

Convention de couleurs et populations

Nous avons regroupé les fossiles étudiés en populations phylétiques (*Homo heidelbergensis* d'Europe et d'Afrique) ou régionales (*Homo erectus* asiatiques). Afin de pouvoir différencier chaque population dans les différents graphiques présentés, nous conserverons au long de l'étude les mêmes symboles (tableau 12).

Tableau 12 : Symboles utilisés pour désigner les différents spécimens dans le cadre des ACP.

Cercle gris	Premiers <i>Homo</i> (<i>Homo rudolfensis</i> , <i>Homo habilis</i>)
Carré noir	<i>Homo ergaster</i> et <i>Homo erectus</i> africain
D ou triangle noir (sans gorilles)	<i>Homo georgicus</i>
Trait noir	<i>Homo erectus</i> asiatique
Etoile noire	<i>Homo cepranensis</i>
Carré gris	<i>Homo heidelbergensis</i>
Carré blanc	Arago3D
Losange noir	<i>Homo neanderthalensis</i>
Losange gris	<i>Homo sapiens</i> non historiques
Cercle blanc	<i>Homo sapiens</i> historiques
Cercle noir	<i>Australopithecus africanus</i>
Triangle gris	Paranthropes
Triangle blanc	Chimpanzés
Triangle noir	Gorilles

Les fonctions superimposition Procuste et Analyses en Composantes Principales du logiciel Morphologika sont résumées en figure 33.

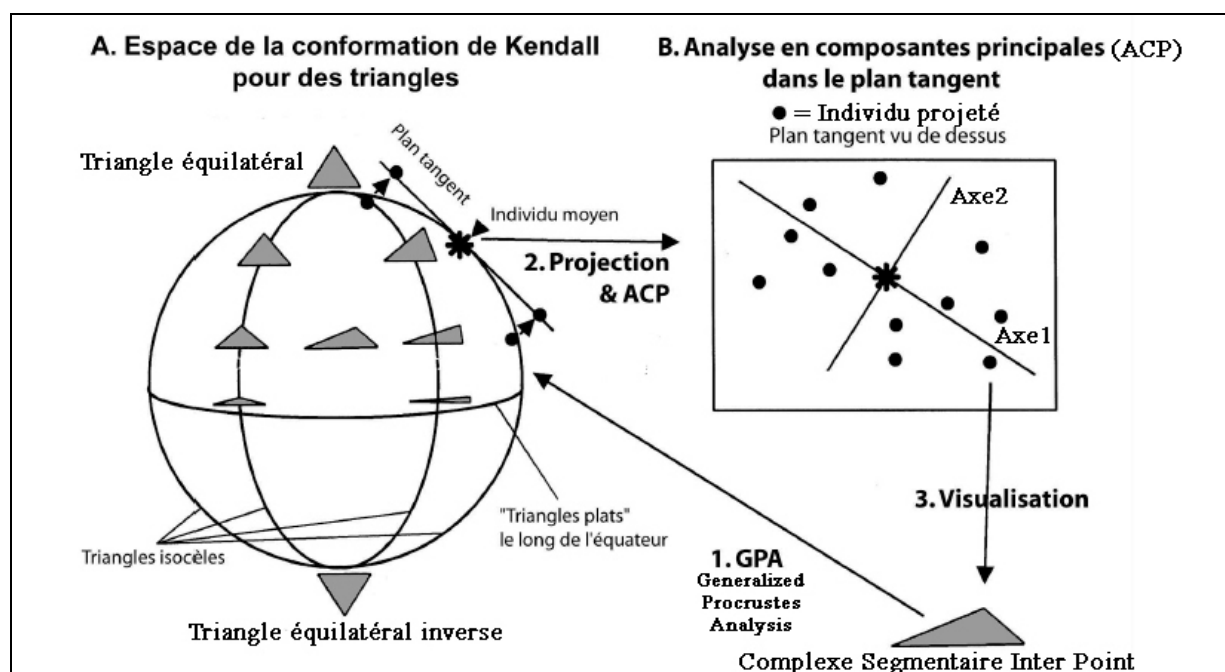


Figure 33 : Représentation de l'espace de Kendall pour des triangles et principe du traitement des données pour l'analyse et la représentation des spécimens (triangles) dans un plan euclidien tangent passant par la forme consensus (individu moyen) de la superimposition (d'après O'HIGGINS *et al.*, 1998 ; DETROIT, 2002).

III.2.5.4.4 Thin-Plate Splines. Méthode des plaques minces ou TPS

Une des techniques de comparaison des modélisations tridimensionnelles consiste à représenter les différences dans un diagramme de déformations qui lisse les configurations de points de repères dans leur ensemble.

La meilleure représentation de ces déformations est une « grille de transformation cartésienne » dans laquelle les différences sont décrites via les distorsions d'une grille orthogonale (THOMPSON, 1917). Nous allons utiliser une approche nécessitant des fonctions mathématiques, appelée méthode des « plaques minces » ou Thin-Plates Splines (TPS ; BOOKSTEIN, 1989 ; MARCUS *et al.*, 1996 ; DRYDEN & MARDIA, 1998). Cette technique permet une analogie mathématique de surface convenable par une grille de métal fin.

La grille obtenue indique comment l'espace autour d'une figure de référence peut être déformé pour obtenir la figure attendue. La fonction mathématique permet la correspondance des points de repères de références avec ceux de la cible par un lissage des points compris entre les points de repères. Cette méthode nécessite une courbure minimale de l'espace entre les points de repères.

L'adaptation des points à proximité de la forme de référence et des points à proximité de la cible interpole efficacement les homologues biologiques des points de repères dans l'espace entre eux. La méthode des plaques minces (TPS) est par conséquent une planification mathématique des homologues.

La visualisation des différences entre la forme cible et celle de référence sous forme de grilles de déformation régulières résultant de TPS est facilement interprétable (BOOKSTEIN, 1989 ; figure 34). Cette méthode d'interpolation entre les grilles n'est pas unique, mais elle minimise les énergies de courbure.

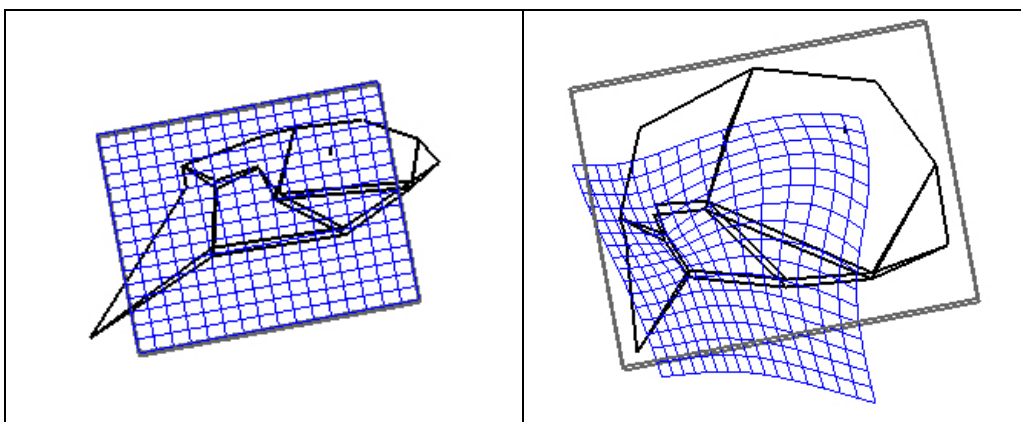


Figure 34 : Comparaison par la méthode des plaques minces de la modélisation tridimensionnelle en 24 points d'un crâne de Gorille avec celle d'un *Homo sapiens* historique.

La grille obtenue présente les différentes modifications nécessaires pour passer du crâne de référence à celui cible. Nous avons dans l'exemple présenté, entre autre, un retrait du prosthion et une réduction de la face (réduction du prognathisme facial), une avancée du front, une poussée du pariétal. La grille générée peut être isolée et étudiée dans différents plans pour avoir une meilleure analyse spatiale (figure 35). La possibilité de déplacer cette grille dans l'espace permet de mieux observer, appréhender et analyser des changements de configurations spatiales qui ne pourraient être mis en valeur avec un plan unique.

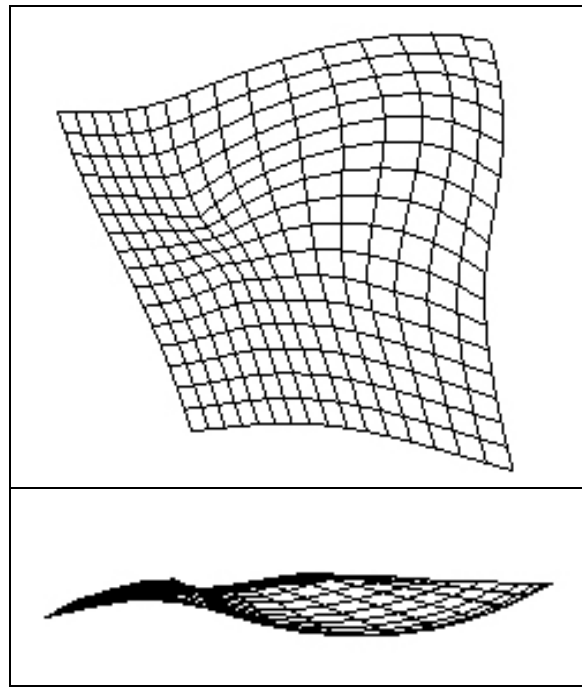


Figure 35: Grille de déformation TPS seule ; Vue latérale gauche et supérieure.

Il est possible de ne présenter que les grilles seules (figure 35) mais nous combinerons les grilles de déformation avec les Complexes Segmentaires Inter Points.

Nous prenons pour chaque population étudiée la modélisation théorique moyenne comme référence. Nous avons choisi pour chaque comparaison de population à population de prendre comme référence le groupe le plus ancien des deux. Dans le cas de populations contemporaines, la référence est constituée par la population possédant le plus grand effectif.

Dernière contrainte du programme Morphologika, un cube virtuel des grilles de déformations est créé. Celui-ci s'adapte à la plus grande longueur entre les points de repères. Cette structure n'est donc pas forcément alignée sur la modélisation. Nous réorientons donc

les grilles de déformations afin d'obtenir un point de vue identifiable et compréhensible suivant les cas. Cette correction s'avère nécessaire et est prise en compte dans les commentaires. Nous présentons en figure 36 un exemple concret de ce problème.

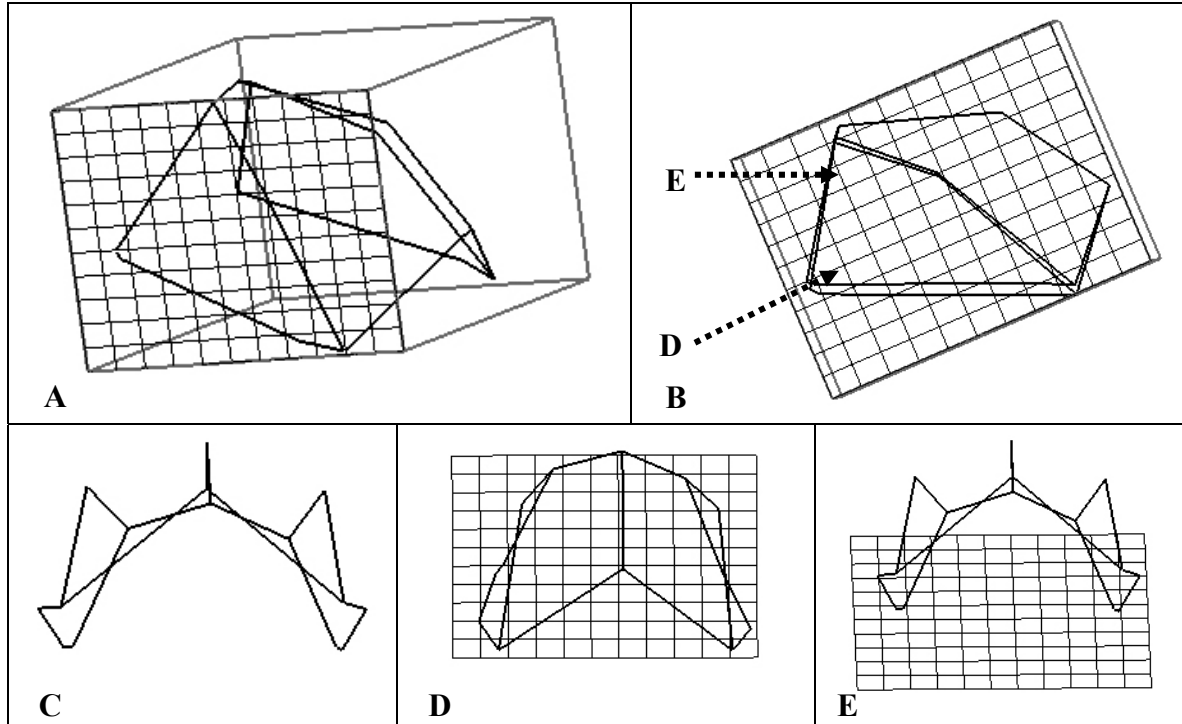


Figure 36: Grilles de déformation réalisées avec Morphologika. A : Volume cubique de déformation ; B : Axes des différentes projections utilisées ; C : Projection frontale de la modélisation tridimensionnelle sans la grille de déformation ; D : Projection frontale de la grille de déformation ; E. Projection frontale de la modélisation tridimensionnelle avec la grille de déformation.

Chap. IV : Nouvelle Reconstruction du Crâne Arago 21-47 à partir de l'Imagerie Tridimensionnelle : La Chimère Arago3D

L'objectif était de proposer une nouvelle reconstruction du crâne Arago 21-47 en utilisant les nouveaux outils virtuels (imagerie numérique et les logiciels de manipulation tridimensionnelle).

Les déformations subies par le massif facial et l'os frontal ont entraîné une fracturation de ceux-ci, mais aussi un morcellement de l'os frontal entre les fragments déplacés.

IV.1 Reconstitution virtuelle de la face et de la voûte bipariétale

Après examen des différents fragments originaux attribués au même individu, le travail de reconstruction a nécessité deux étapes différentes : 1/ Compenser les déformations post-mortem subies par Arago 21 ; 2/ Positionner les fragments de pariétaux Arago 47, 47A et 3A. Ce travail ne pouvait être réalisé avant d'avoir restauré la face.

IV.1.1 Fracturations et déformations post-mortem de la face Arago 21

Nous avons différencié les déformations de type architectural de celles de type structural. Les premières correspondent à une rupture de la continuité du contour osseux tel qu'une fracture avec basculement, la subduction ou l'abduction d'un fragment par rapport à l'autre, phénomènes observables au niveau de l'écaille frontale gauche. Les déformations structurales correspondent à des enfoncements de l'os n'entraînant pas d'aberration de la physionomie générale de la pièce osseuse (maxillaire droit). Nous avons travaillé sur les déformations structurales et décidé de ne conserver que les zones n'en possédant pas.

Le côté droit du fossile est celui le plus exploitable. Nous avons conservé le maxillaire droit, malgré sa fracturation. Cette fracture correspond à un enfoncement de la couche externe du maxillaire au niveau du trou sous-orbitaire, c'est-à-dire à une déformation structurale. La comparaison avec un autre fragment osseux de maxillaire droit d'un autre individu de la Caune de l'Arago, Arago 45, montre une correspondance morphologique entre les deux fossiles (Arago 21 et 45).

En vue frontale (figure 37), le malaire et le maxillaire droit paraissent plus déformés que le coté gauche mais l'hémiface gauche a subi une rotation anti-horaire en vue postérieure (avancée de la zone nasale et recul de la zone externe ; figure 38). Ce mouvement de rotation (architectural) se retrouve aussi au niveau de l'os frontal où la partie droite du torus est intacte tandis que le bord gauche chevauche la partie médiane de l'écaille. L'os a subi une pression latérale venant de la gauche responsable de la plicature de la partie postérieure de l'écaille, plus fine.

Du fait de sa plus grande épaisseur, le début de l'écaille attenant au torus gauche s'est fracturée et a subi un mouvement de chevauchement. La déformation a été moindre pour le maxillaire par rapport à l'arcade gauche en raison de l'absence de suture à ce niveau là. La contrainte latérale a fracturé l'arcade osseuse et a entraîné un chevauchement des zones déformées (phénomène particulièrement visible sur la partie gauche de l'écaille). La portion médiane de l'écaille antérieure est bien conservée ce qui n'est pas le cas du bord bregmatique. Celui-ci a été soulevé (plicature). Par contre, tout le coté droit de l'écaille (excepté le bord coronal) est intact. La facette temporale du frontal a été préservée à l'exception d'une zone où la table externe de l'os frontal a commencé à se décoller.

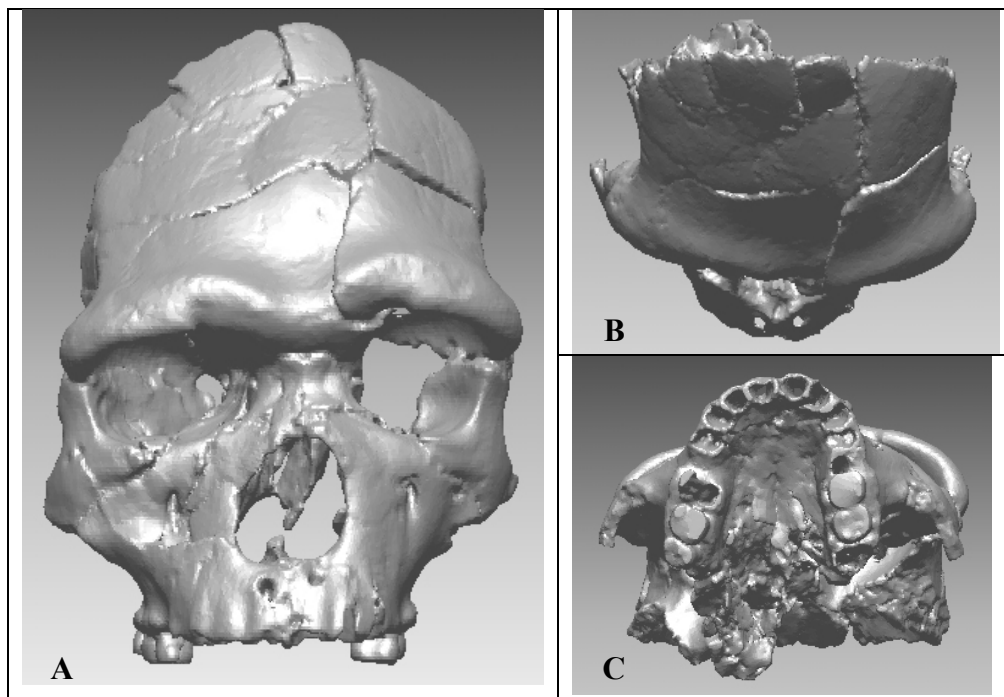


Figure 37 : Vues tridimensionnelles d'Arago 21 ; A : frontale ; B : supérieure ; C : inférieure.

Au niveau du palais, en vue inférieure (figure 37), le bord alvéolaire gauche apparaît droit, parallèle au plan sagittal médian, dessinant un héli palais rectangulaire. Le bord droit présente un contour parabolique. Le plafond osseux du palais a été compressé latéralement avec un enfoncement sagittal vers le haut de cette structure. Ceci a entraîné au niveau de la cavité nasale la déformation du septum nasal. La déformation gauche semble résulter d'une compression latérale qui se serait exercée sur le côté gauche (figure 38).

Nous supposons que le fossile a subi un enfoncement latéral à gauche, appliqué sur la partie postérieure de cette face gauche (figure 38). L'hémiface droite dans son ensemble (sauf le bord coronal), ne présente pas de déformation architecturale mais uniquement structurale, à l'inverse du bord gauche du fossile.

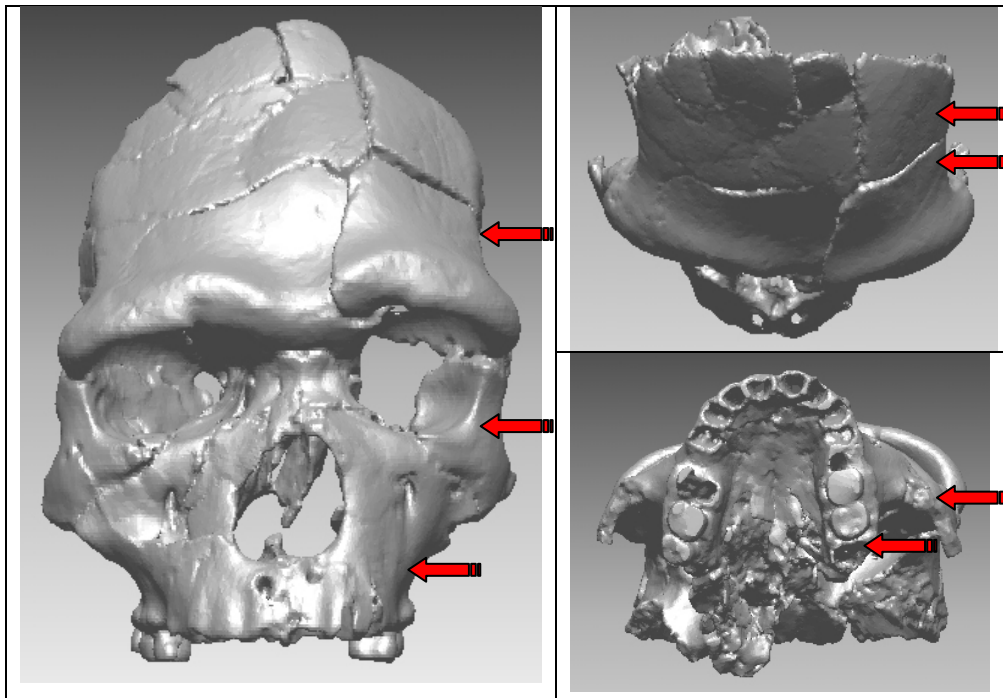


Figure 38 : Orientation des pressions subies par Arago 21.

IV.1.2 Corrections virtuelles des déformations post-mortem de la face Arago 21

Nous avons choisi la symétrisation informatique suivant l'axe sagittal comme méthode de compensation des déformations. Le plan a été défini à partir du prosthion, du nasion, de la glabellle et du point supraglabellaire. Bien que seuls trois points soient nécessaires pour définir un plan, nous en avons pris quatre pour être sûr de l'alignement de ce plan.

La face a été virtuellement découpée suivant le plan sagittal et seul le côté droit a été conservé. Puis la fonction miroir (mirroring) a été utilisée pour reconstituer le double gauche (figure 39). L'enfoncement du maxillaire a été partiellement compensé au préalable.

Cette étape permet d'obtenir deux cavités orbitaires identiques. La portion coronale de l'écaille frontale cérébrale n'est pas encore corrigée. Il a donc été nécessaire de rabattre les fragments dépassant (figure 40). Les principaux fragments ont été découpés virtuellement et articulés différemment. Les enfoncements de structure au niveau de l'écaille ont été compensés lors de la finalisation de la reconstruction.

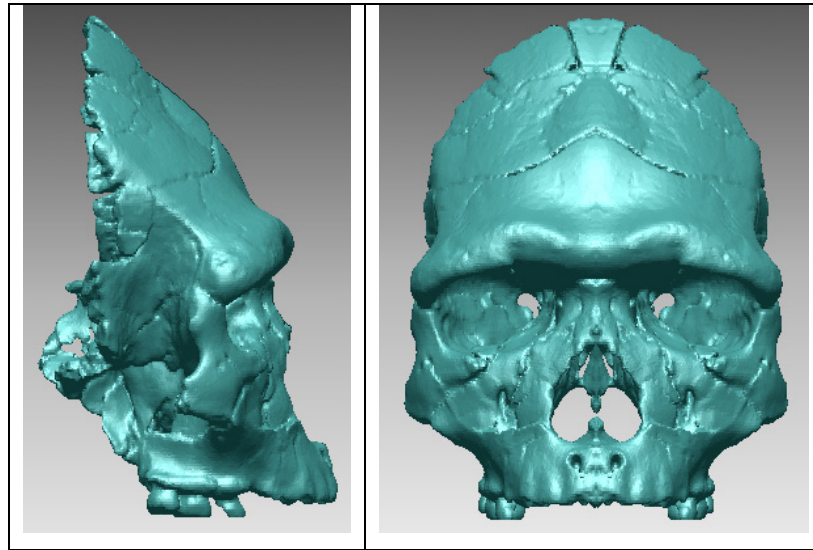


Figure 39: Résultat de la symétrisation virtuelle de la face Arago 21 (vue sagittale et frontale).

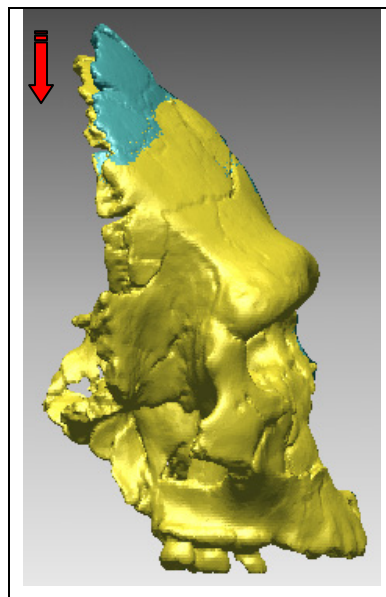


Figure 40: Position de la suture coronale de la face Arago 21 avant et après découpage et nouvelle articulation virtuelle des fragments de l'écaille frontale cérébrale.

Nous obtenons une face restaurée (figure 41) qui présente deux cavités orbitaires rectangulaires (A), un front curviligne un peu fuyant (B) et une suture coronale quasi continue (D). Certaines fractures subsistent en raison de l'état du fossile original. La principale fracture traversant le front d'un bord à l'autre a été conservée et a généré un relief sagittal que nous avons compensé par la suite, lors de la finalisation de la reconstruction. De profil, la courbure sagittale est continue (B). En vue inférieure les arcades dentaires présentent une forme parabolique. L'écaille frontale cérébrale est plus divergente postérieurement (D).

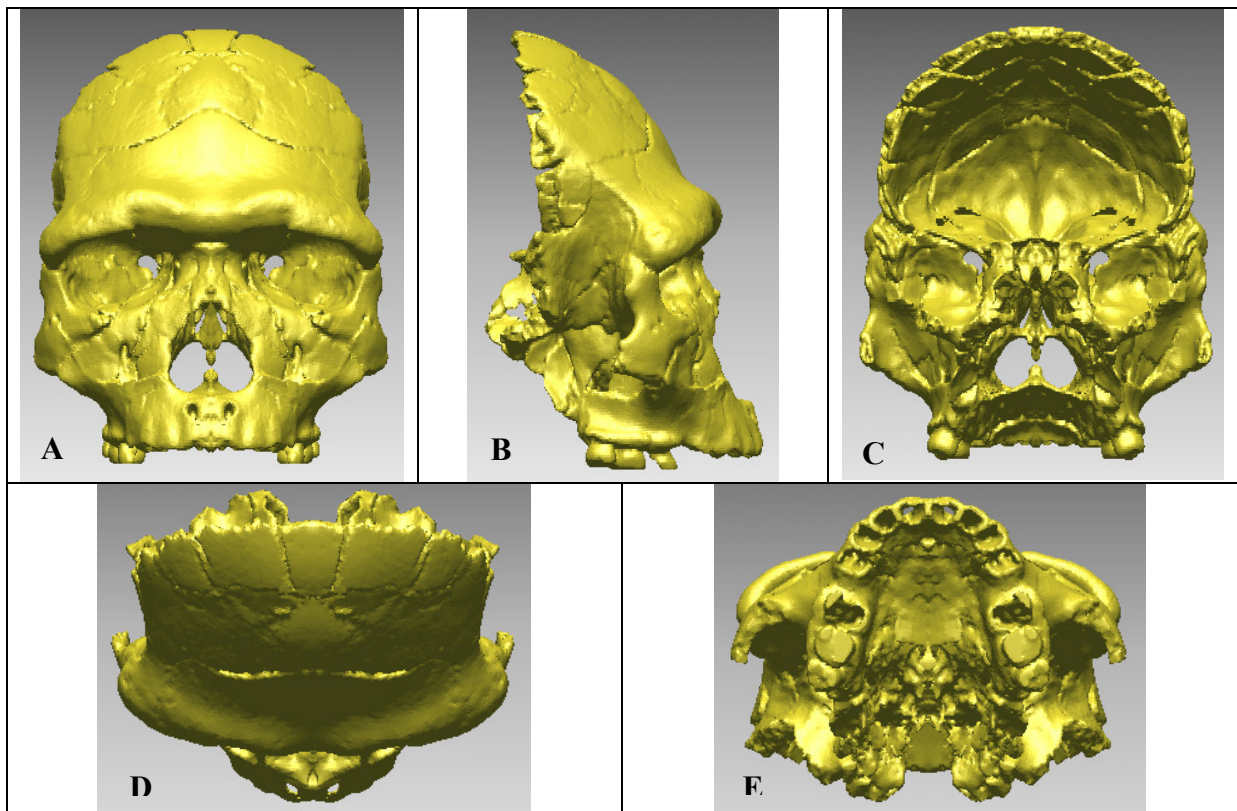


Figure 41 : Résultat de la correction de la face Arago 21. Différentes vues ; A : frontale ; B : profil droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : inférieure.

Après avoir terminé la reconstitution de la face Arago 21, nous avons procédé à l'intégration des fragments de l'os pariétal droit, Arago 47 et 47A ainsi que celui du gauche, Arago 3A.

IV.1.3 Mise en connexion virtuelle des fragments Arago 47, 47A et 3A sur la face Arago 21

Nous avons déterminé, comme Grimaud (1982b) et E. Spitery (1982, 1984), qu'il est nécessaire d'accroître la largeur de la voûte bipariétale et l'angle astérion-lambda-astérion pour réduire l'angulation postérieure entre les deux pariétaux. L'accroissement de cette largeur bipariétale nécessite de relever le bord postéro-inférieur droit du pariétal Arago 47. Ceci devrait aussi réduire la convexité vers la droite de la suture sagittale une fois le symétrique gauche obtenu (figure 42).

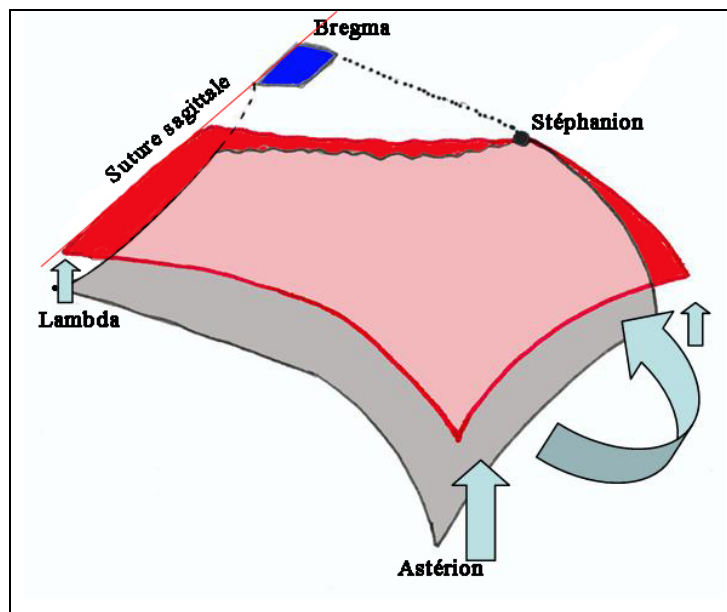


Figure 42 : Proposition de mouvement à appliquer au pariétal droit Arago 47.

Le positionnement du pariétal a été effectué en trois étapes successives :

1/ Pré-positionnement du fragment principal Arago 47 en arrière et au contact de la face au moyen de distances pré-calculées entre différents points de repères sur Arago 47 et Arago 21 (figure 43).

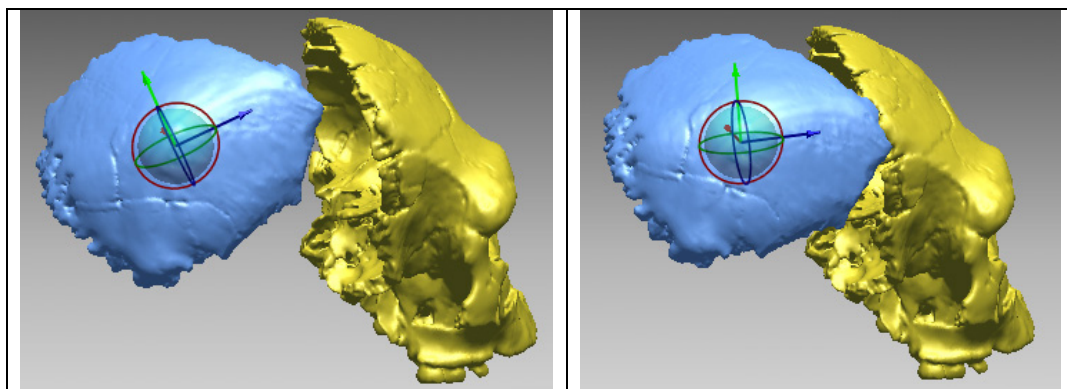


Figure 43 : Articulation virtuelle d'Arago 47.

2/ Le pariétal droit positionné, nous avons utilisé la fonction miroir afin d'obtenir le symétrique gauche. Nous avons calculé différentes valeurs telles que l'angle astérion gauche – lambda – astérion droit, la distance biastérique et la distance bistéphanique. Ces distances ont été au préalable relevées sur une partie de la population fossile étudiée, allant de la fin du Pléistocène inférieur final au Pléistocène moyen récent (Annexe 4).

3/ Nous avons positionné les fragments antérieurs du pariétal droit et gauche Arago 47A et Arago 3A (figure 44). Le placement de ces deux fragments permet d'ajuster les deux pariétaux dans le sens antéro-postérieur en les faisant basculer vers l'avant ou l'arrière, et permet de préciser la courbure sagittale du crâne. Ces deux fragments ont aussi été utilisés pour confirmer la courbure coronale d'Arago 21.

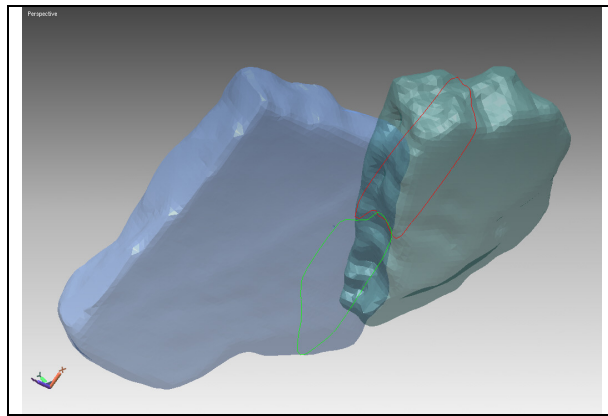


Figure 44: Assemblage virtuel d'Arago 47A (à droite) avec Arago 3A.

Au terme de cette étape nous obtenons une proposition de reconstruction et d'assemblage des restes originaux d'Arago 21 – 47 – 47A – 3A et du symétrique du pariétal droit (figure 45).

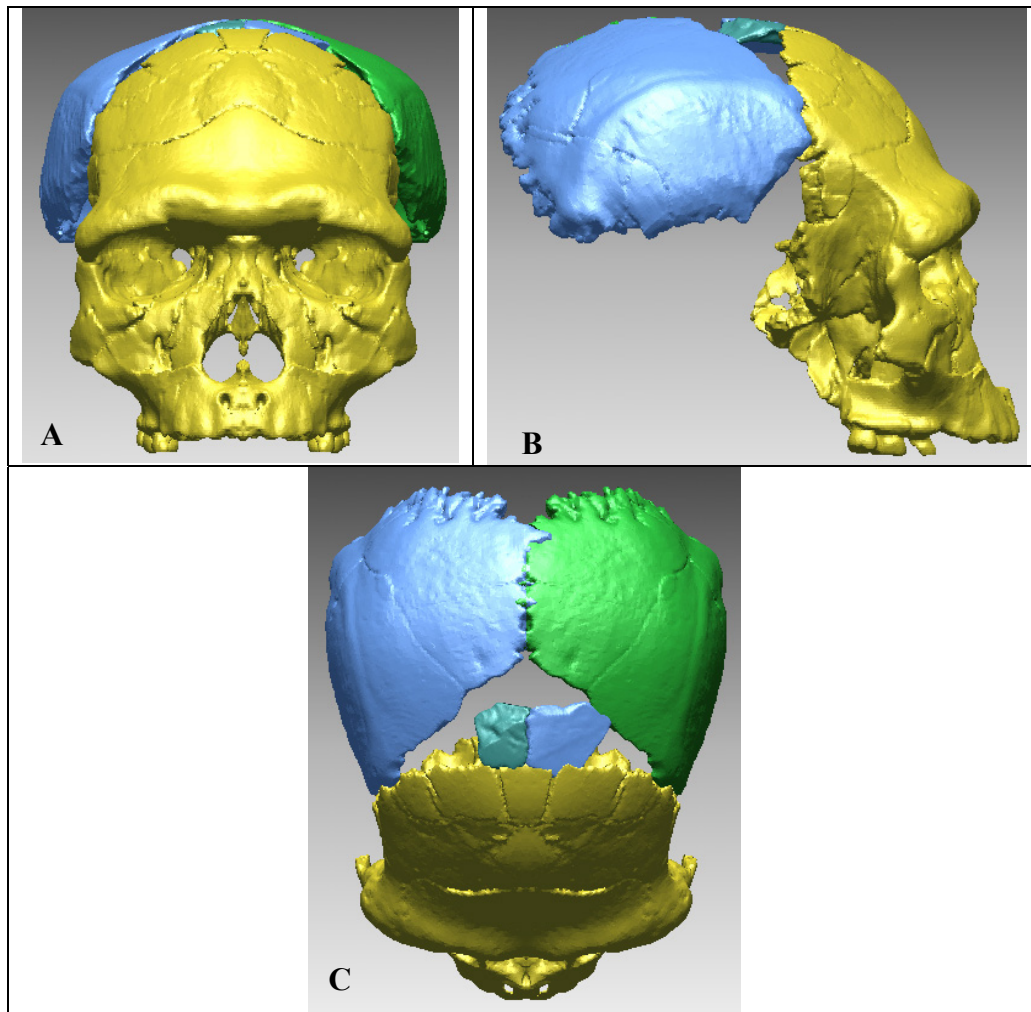


Figure 45: Arago3D après intégration virtuelle des fragments Arago 3A, 21, 47, 47A et du symétrique d'Arago 47. Différentes vues ; A : frontale ; B : profil droit ; C : supérieure.

IV.2 Réalisation d'une chimère : Arago 3D

En paléanthropologie, une chimère correspond à une reconstruction utilisant des fragments allochtones, provenant d'un autre spécimen. Ainsi les premières reconstitutions du crâne Arago 21-47 sont des chimères (moulages des os temporaux de Sangiran 17 et de l'occipital de Swanscombe ou autre). En permettant d'obtenir une reconstruction globale d'un crâne dont seuls des fragments sont disponibles, les chimères constituent un outil pour la réflexion paléanthropologique et l'analyse phylétique.

Leurs réalisations reposent sur l'évaluation de la compatibilité d'une pièce osseuse manquante avec un fragment provenant d'un autre fossile ayant la morphologie générale du

crâne fragmentaire dont on veut réaliser une reconstruction. Les chimères obtenues sont d'autant plus plausibles que les fragments proviennent d'individus phylétiquement proches.

Dans un deuxième temps il est possible d'appliquer à la proposition les méthodes d'analyses morphométriques afin de comparer la chimère.

Afin de dissocier notre proposition de reconstruction des précédentes réalisées, nous appellerons notre chimère Arago3D.

IV.2.1 Intégration d'un os occipital et d'os temporaux dans la reconstruction tridimensionnelle Arago 3D

A la suite de reconstruction de la face Arago 21 et au positionnement du pariétal droit et de son symétrique gauche nous avons choisi les pièces anatomiques parmi les fossiles allant de la fin du Pléistocène inférieur final au Pléistocène moyen récent (Kabwe, Bodo 1, Ceprano 1, Petralona, Sima de los Huesos 5). Nous n'avons considéré que des *Homo heidelbergensis* et/ou des Anténéandertaliens.

Nous avons constaté une grande similitude des profils sagittaux entre Arago 21-47 et Ceprano (figure 46). Ceprano présente un même profil sagittal frontal que notre reconstruction virtuelle d'Arago 21. En raison de l'état fragmentaire de la voûte bipariétale de Ceprano, nous ne pouvons comparer qu'un profil para-sagittal écarté de quelques millimètres du plan sagittal sur le côté droit. La courbure de la voûte bipariétale est assez semblable dans la portion antérieure celle-ci. La courbure de Ceprano est plus marquée à partir du point médian de la voûte. Cependant la courbure générale est la plus semblable.

Parmi les autres individus comparés, Sima de los Huesos 5 et Bodo 1 sont les individus dont la courbure sagittale de l'écaille frontale cérébrale est la plus semblable. Par contre au niveau de la voûte bipariétale Sima de los Huesos 5 est moins large que notre proposition de reconstitution (Annexe 4) et Bodo 1 ne présente plus d'occipital et seulement une portion antérieure du temporal gauche.

Les sutures coronales d'Arago et Ceprano présentent le même contour. Le profil sagittal frontal est lui aussi identique. La forme externe des arcades orbitaires et de leur torus présente un retrait tandis que l'espace inter-orbitaire s'avère aussi massif. Les arêtes frontales temporales sont parallèles comme celles d'Arago 21 avec une légère divergence postérieure. La divergence de l'écaille cérébrale frontale est également peu importante.

Ceprano 1 présente également une morphologie similaire au niveau de la voûte bipariétale (figure 47). Les deux individus présentent un très fort torus angularis, caractère peu observé avec un tel degré de prononciation. Ce caractère correspond selon E. Spitery (1984) et E. Vlček (1986) à un torus occipital transverse plus marqué que celui de Swanscombe, ce qui est le cas de Ceprano. Les deux pariétaux sont relativement épais et massifs d'aspect. Les largeurs biastériques sont semblables (Annexe 4), contribuant à donner des angles astérion–lambda–astérion similaires pour Ceprano 1 et notre proposition de reconstruction.

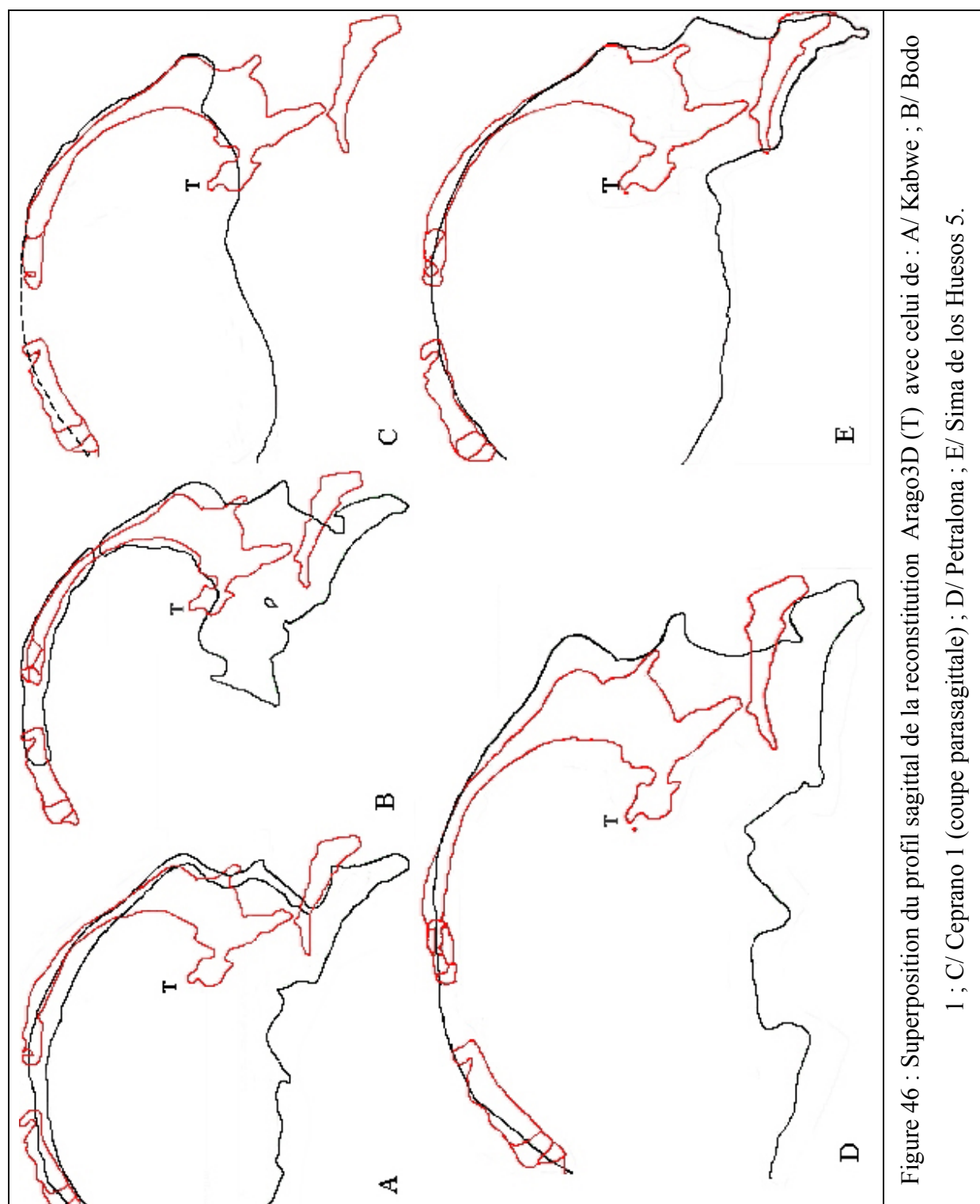
La corde droite astérion – kryptaphion est de 87 mm sur notre proposition contre 86 mm sur Ceprano 1. Les sutures pariéto-temporales ont donc la même longueur.

Nous avons conscience que Ceprano est un crâne déformé et reconstitué, notamment au niveau de la voûte bipariétale et qu'il pourrait être source de biais, mais nous n'avons utilisé ce crâne que pour comparer les profils sagittaux et parasagittaux, le torus angularis et trouver des fragments allochtones. Nous ne nous en sommes pas servie comme référence pour positionner Arago 47.

L'intérêt pour le crâne de Ceprano 1 réside dans la présence d'un os occipital relativement complet malgré les fractures. Cet occipital ne semble pas présenter de déformations. Il permet de comparer la largeur biastérique ainsi que l'angle astérion-lambda-astérion. Les valeurs relevées sur Ceprano sont les plus semblables à celles de notre reconstruction d'Arago 21-47.

Nous avons donc choisi de découper virtuellement l'os occipital de Ceprano.

Bien que les os temporaux de Ceprano soient aussi fragmentaires, la similitude des valeurs astérion – kryptaphion relevées et l'utilisation de l'occipital de Ceprano nous ont amené à prélever virtuellement ces os temporaux afin de les intégrer à notre chimère.



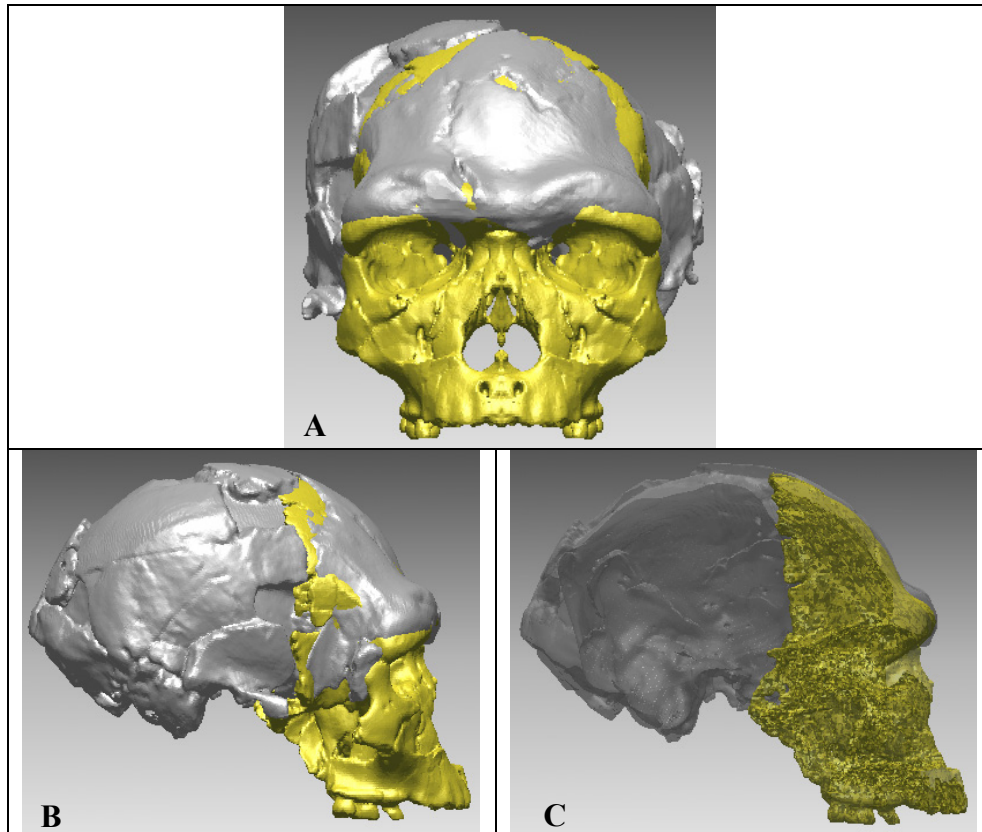


Figure 47: Comparaison du frontal restauré d'Arago 21 et de Ceprano 1. Vues : A : frontale ; B : profil droit ; C : profil droit, coupe sagittale.

Nous avons prélevé virtuellement les deux os temporaux sur une reconstruction tridimensionnelle d'un moulage de Ceprano 1. Nous les avons ensuite intégrés à notre proposition de reconstruction Arago3D (figure 47). Les structures anatomiques correspondent. L'écaille gauche du temporal recouvre le pariétal symétrisé au niveau de la zone de suture correspondante visible sur l'os. L'astérion correspond quasiment sur les deux côtés. Les extrémités de l'arcade zygomatique sur la face et sur le temporal droit sont presque alignées en vue latérale et en vue supérieure. Dans le plan frontal, la suture coronale est régulière, sans rupture brutale d'orientation. Il y a articulation entre le sphénoïde et le temporal gauche (écaille la mieux conservée). Ce n'est pas le cas pour le temporal droit, plus fragmentaire. Cette intégration a lieu aussi sans rupture de courbure.

Nous n'avons pas reconstitué de temporal complet par assemblage des fragments gauche et droit de Ceprano 1 en une forme consensus.

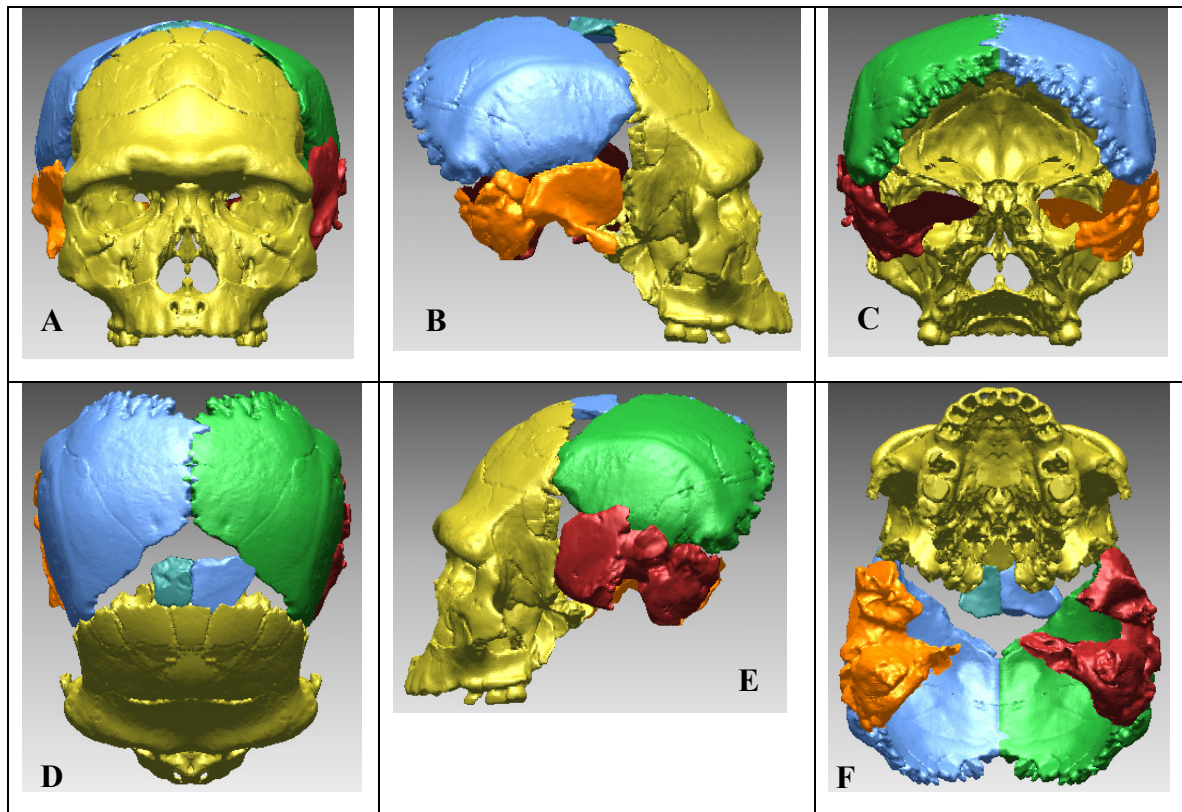


Figure 48 : Intégration virtuelle des os temporaux de Ceprano 1 sur notre proposition d'Arago 21-47 en vues : A : frontale ; B : profil droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : profil gauche ; F : inférieure.

Nous avons ensuite procédé au découpage virtuel puis à l'intégration de l'occipital de Ceprano 1. Celui-ci s'articule parfaitement entre Arago 47 et son symétrique (figure 48). La largeur biastérique reconstituée correspond à celle de Ceprano, tout comme la hauteur de l'écaille. Par contre, la zone du foramen magnum n'a pas été reconstituée, celle-ci étant absente chez Ceprano 1. Seule subsiste la portion antérieure du planum nuchal. La jonction avec les temporaux est quasiment continue, ces ossements possédant presque la même position que sur Ceprano 1.

La jonction entre l'écaille de l'occipital et la partie postérieure des pariétaux présente une légère rupture dans la zone lambdatique. En effet, le pariétal Arago 47 présente des fragments d'os appartenant à l'autre bord de la suture lambdatique, soit d'os wormiens, soit des fragments de l'occipital. Nous n'avons pas modifié ces fragments car ils apportent des informations dont nous discuterons plus tard.

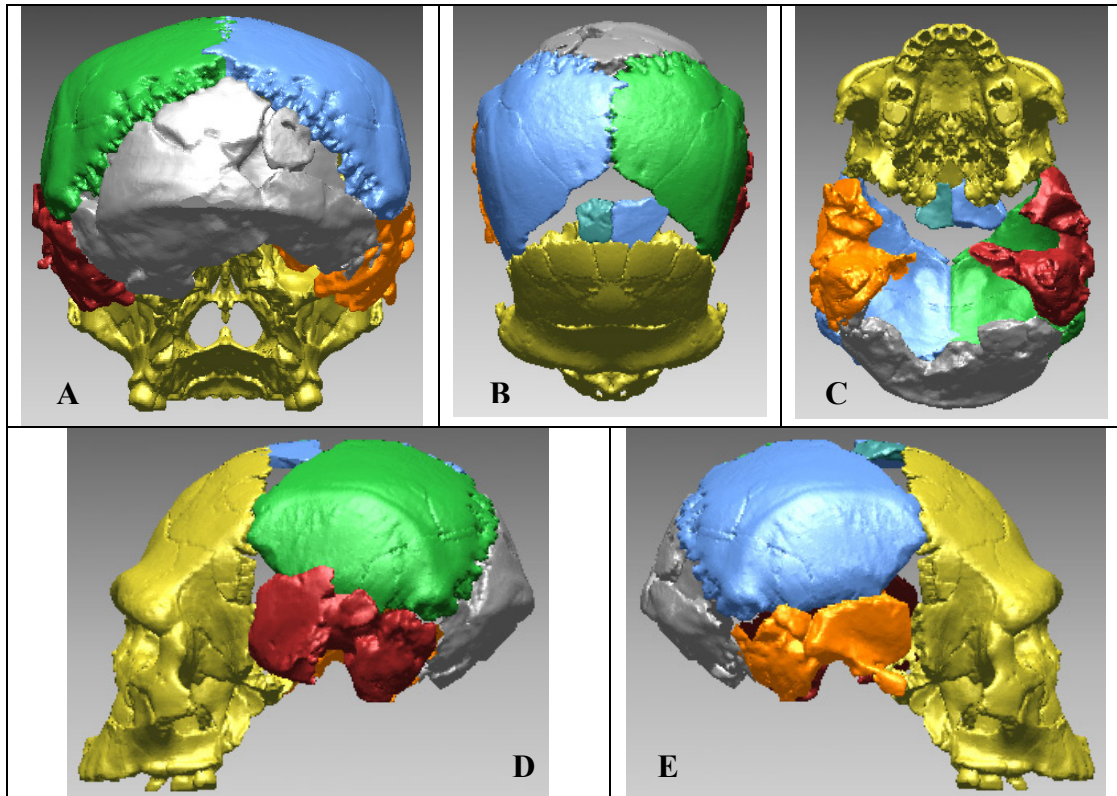


Figure 49 : Ajout de l'os occipital de Ceprano 1 à Arago 21-47. Différentes vues ; A : postérieure ; B : supérieure ; C : inférieure ; D : profil gauche ; E : profil droit.

IV.2.2 Intégration virtuelle des fragments occipitaux Arago 78 et Arago 79

Nous avons virtuellement articulé Arago 78 et Arago 79 en positionnant le condyle d'Arago 79 par rapport à celui d'Arago 78. L'orientation du condyle ainsi que sa hauteur dans l'espace ont été définies en se basant sur l'axe sagittal de l'apophyse basilaire d'Arago 78. Cette opération nous a permis d'obtenir un ensemble occipital antérieur (figure 50) que nous avons intégré entre les os temporaux de Ceprano 1 et la face Arago 21 restaurée (figure 51).

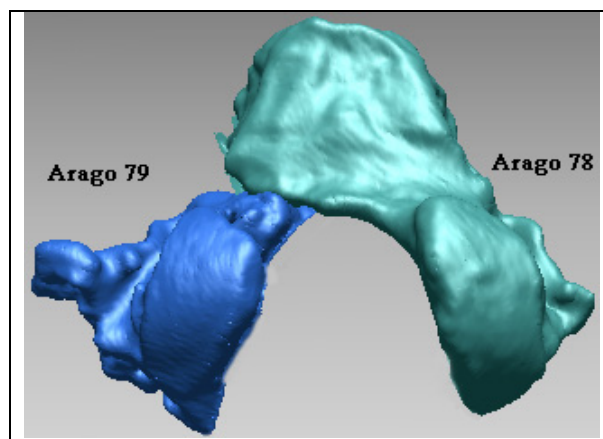


Figure 50 : Arago 78 et 79 en position anatomique.

Pour positionner le bloc occipital antérieur, nous avons aligné les plans sagittaux de la chimère et du bloc Arago 78-79. Nous avons mis en contact les fragments d'occipital d'Arago 78-79 avec ceux de Ceprano 1 en utilisant plus particulièrement l'échancrure jugulaire d'Arago 79 et en la mettant en vis-à-vis de la fosse jugulaire du temporal droit. Ceci a écarté le bloc Arago 78-79 de l'axe sagittal car les fragments mis en contact ne proviennent pas du même individu (Arago3D et Ceprano 1). Nous avons donc conservé la position de ce fragment sur l'axe antéro-postérieur et nous l'avons réaligné transversalement suivant l'axe sagittal médian (figure 51).

Même en avançant ce bloc, il est impossible de le mettre en connexion avec Arago 21 en raison de l'état du corps du sphénoïde très fragmentaire. Par contre les restes du corps du sphénoïde nous permettent de préciser l'inclinaison de ce bloc dans le plan sagittal.

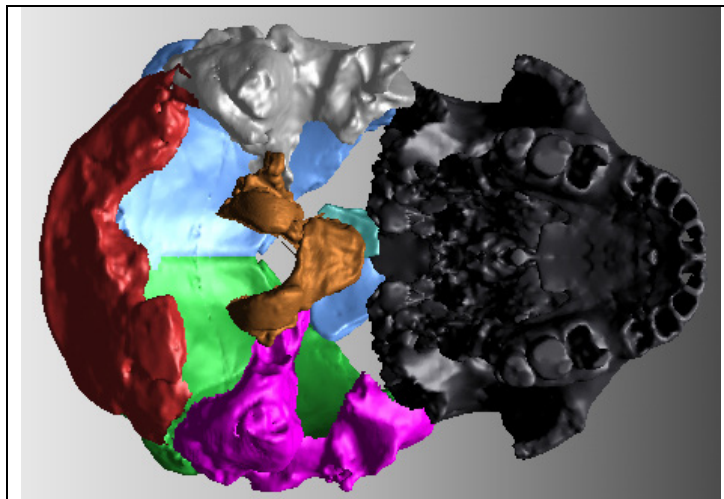


Figure 51 : Arago 78 – 79 en position anatomique et nouvelle proposition de crâne, Arago3D.

IV.2.3 Finalisation de la chimère Arago3D

Dans une dernière étape nous avons procédé à la réduction des fractures superficielles présentes sur la face depuis le maxillaire jusqu'à la suture coronale. Nous avons aussi procédé à la compensation du relief apparu sur l'écaille frontale. Ces opérations ont été réalisées en utilisant la fonction lissage (smooth) des triangles surfaciques.

Nous présentons en figures 52 à 57 différentes vues de notre proposition virtuelle Arago3D sur laquelle des points de repères craniométriques ont été coordonnés tridimensionnellement pour modéliser cet individu lors des comparaisons Procrustes. Le logiciel utilisé pour obtenir ces figures génère une perspective.

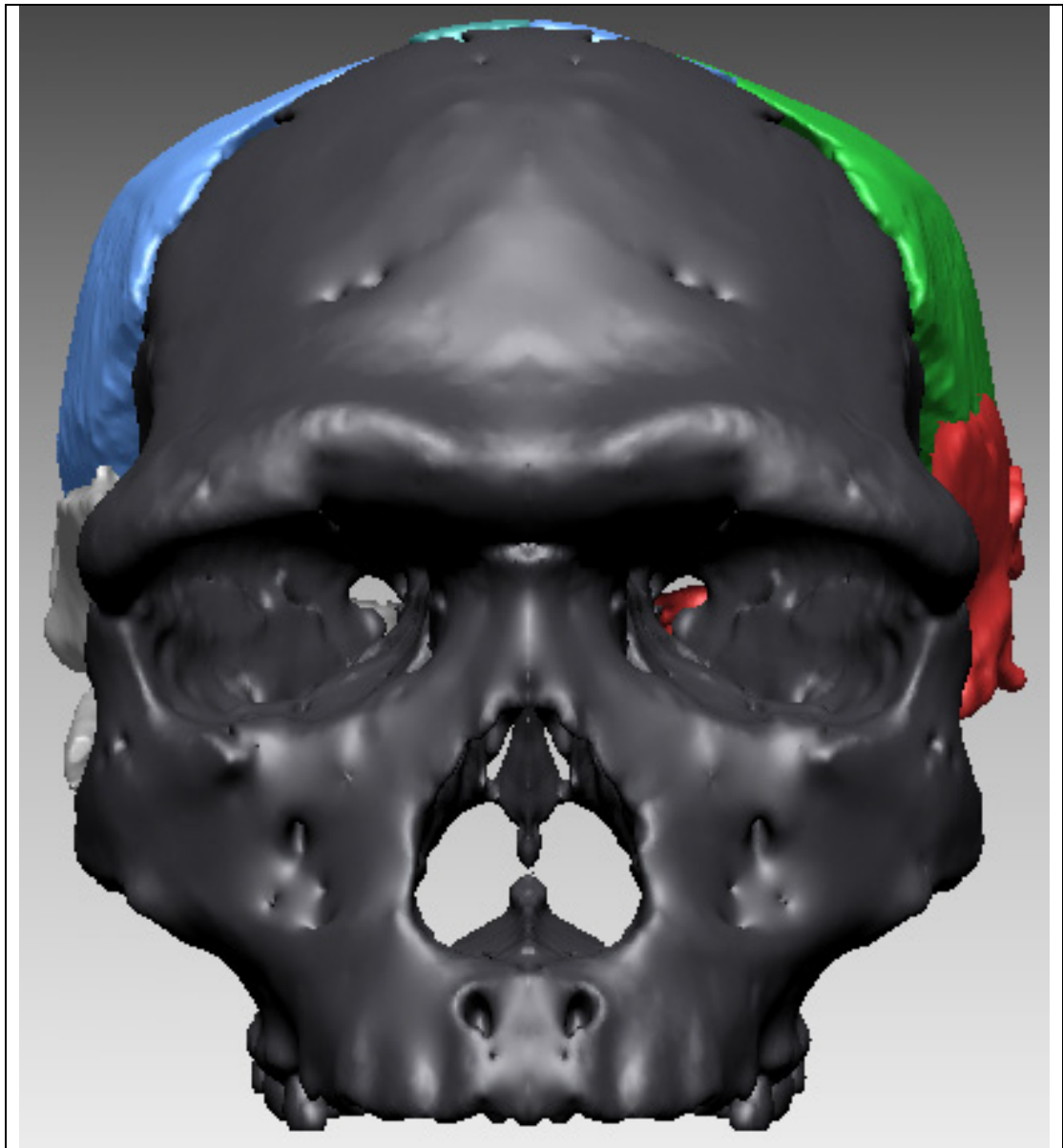


Figure 52: Arago 3D en vue frontale.

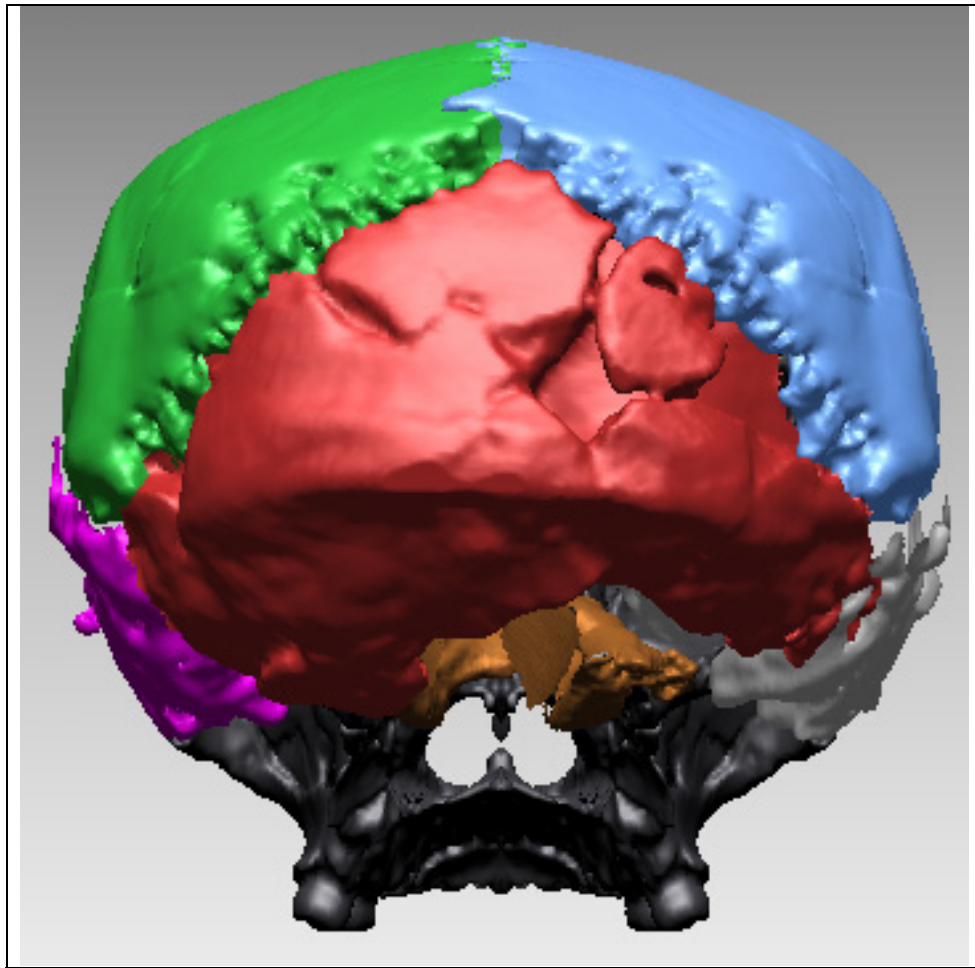


Figure 53 : Arago3D en vue postérieure.

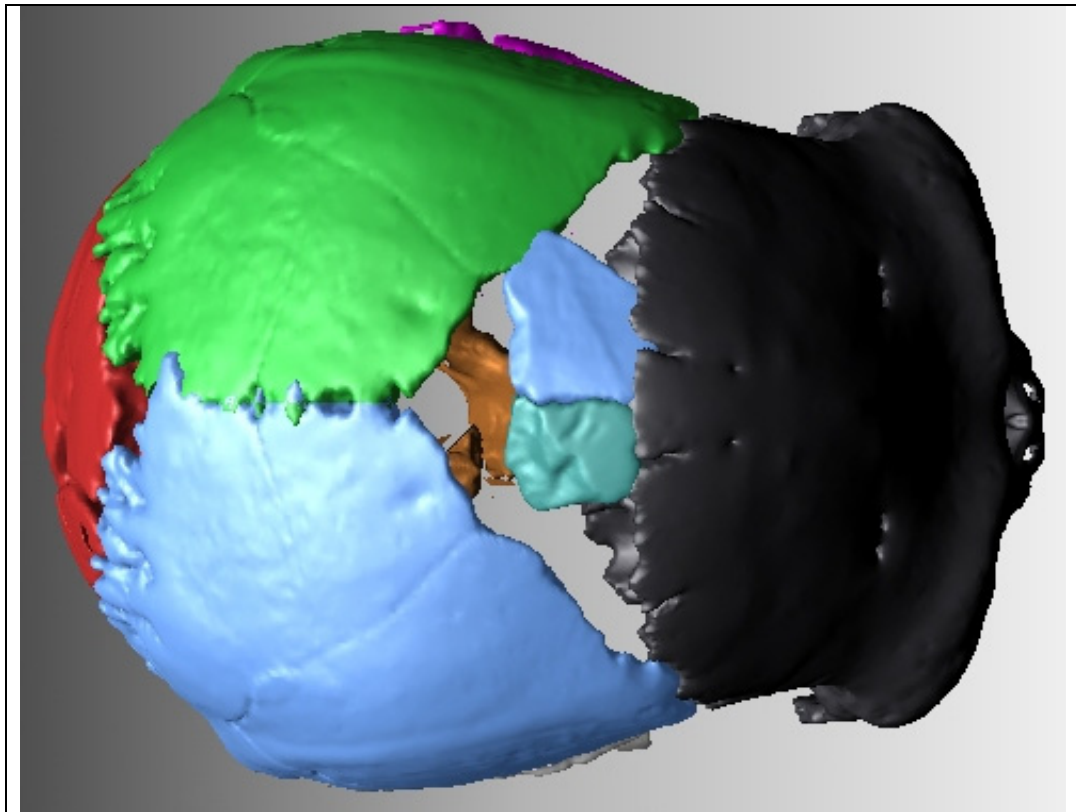


Figure 54: Arago3D en vue supérieure.

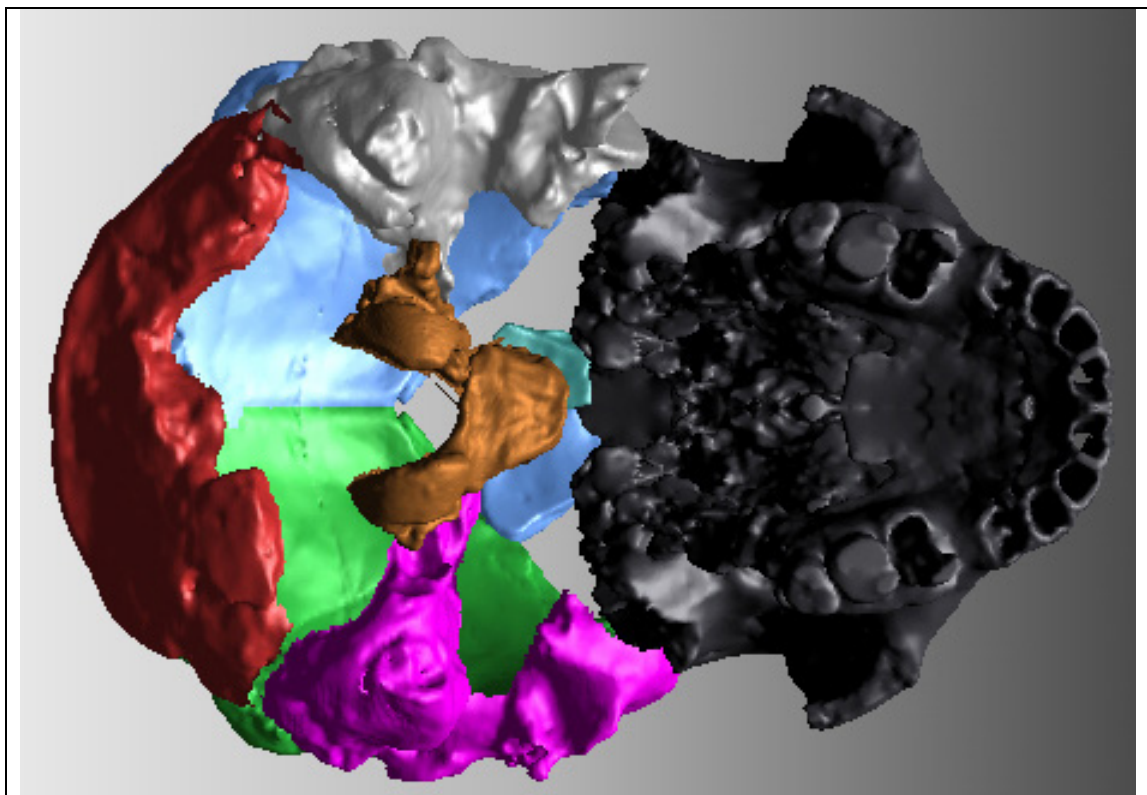


Figure 55 : Arago3D en vue inférieure.

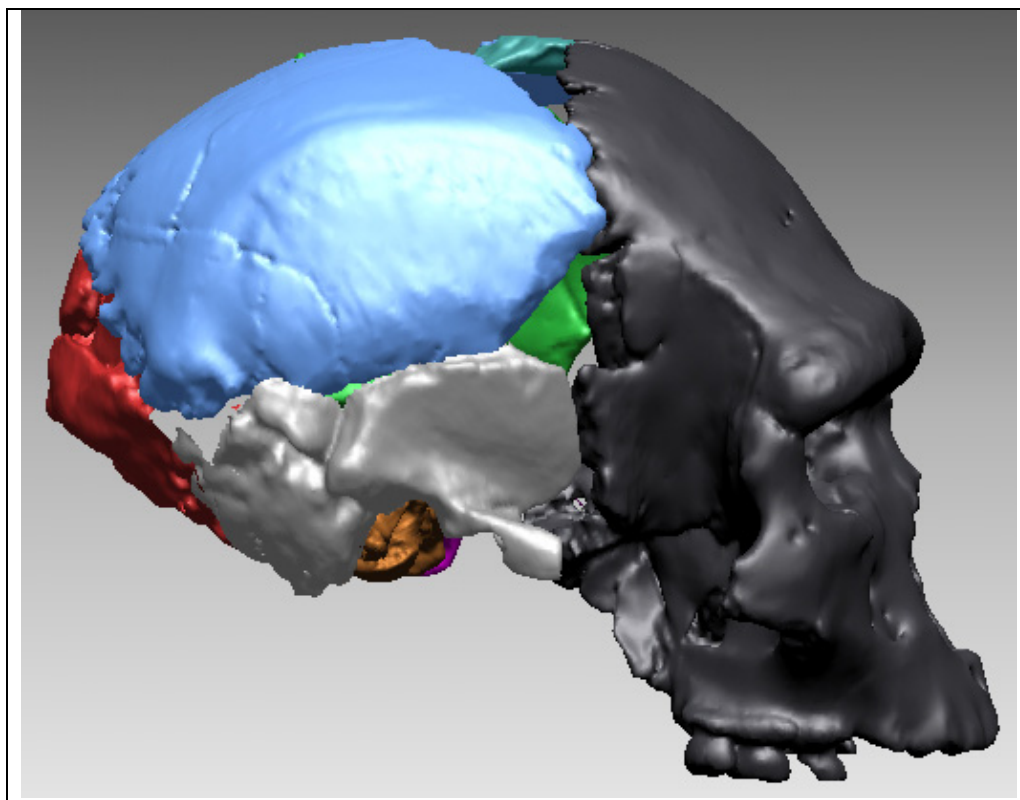


Figure 56 : Arago3D, profil droit.

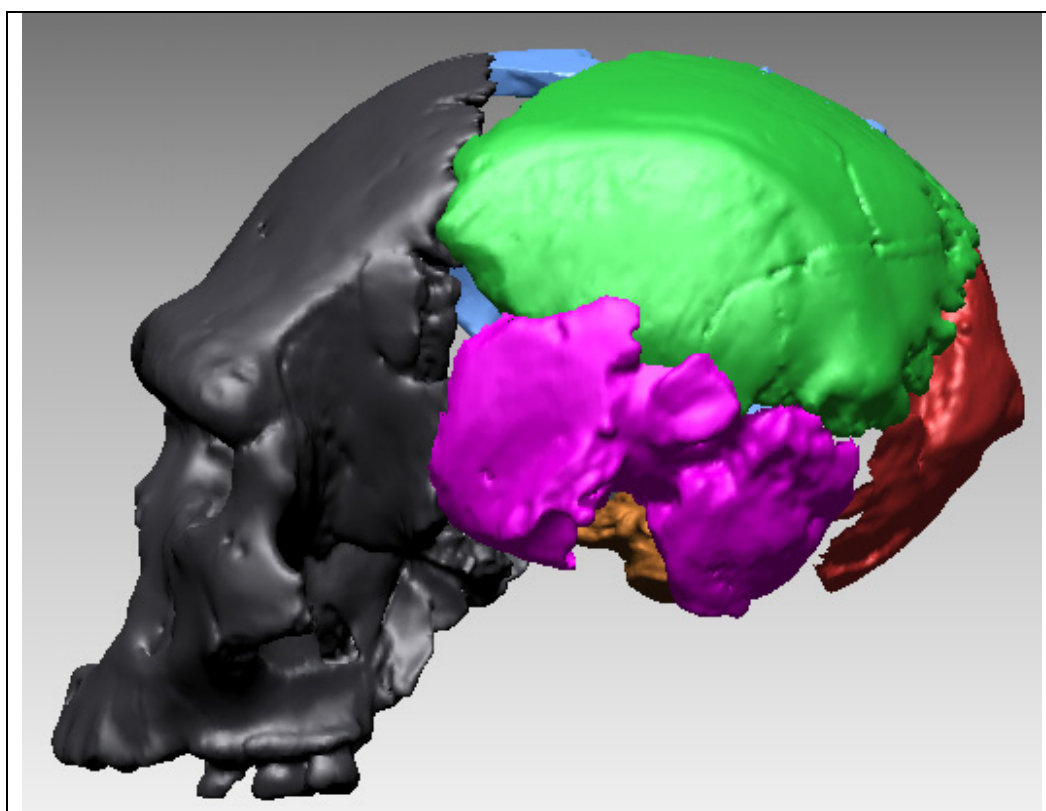


Figure 57 : Arago3D, profil gauche.

IV.3 Résultats et comparaisons de notre proposition de reconstitution virtuelle du crâne Arago3D

La proposition de crâne Arago3D diverge de celles précédemment réalisées par la morphologie de la face et le positionnement du pariétal Arago 47. Nous allons comparer notre proposition avec la première reconstruction d'Arago 21-47 réalisée par Henry et Marie-Antoinette de Lumley en 1981 (Arago1981).

IV.3.1 Comparaison des faces des deux reconstitutions : Arago3D et Arago1981

IV.3.1.1 Différences anatomiques entre Arago3D et Arago1981

Les différences entre les deux faces reconstituées résultent de la nouvelle morphologie de l'hémi-face gauche et du nouveau tracé de la suture coronale.

Au niveau de la zone sus-orbitaire la crête crânio-faciale du frontal d'Arago3D a un trajet général incurvé vers le bas dans la région médiane, vers le haut au-dessus de l'angle supéro-interne de l'orbite. Au-dessus de l'orbite, la crête crânio-faciale a un trajet arciforme, rendu irrégulier par la présence, au-dessus du tiers moyen de la cavité orbitaire, d'une zone aplanie, presque rectiligne, très oblique en bas et en dehors. Cette disposition est différente de celle des Néandertaliens où le torus supra-orbitaire forme au-dessus de chaque orbite un arc dont la convexité est très régulière.

Notre proposition Arago3D a désormais deux cavités orbitaires rectangulaires identiques (résultat de la symétrisation) et non plus une cavité droite rectangulaire et une gauche plus carrée. L'espace inter-orbitaire est toujours large. La cavité nasale est symétrique. Les os maxillaires et malaire de la précédente reconstitution (Arago1981) sont plus antérieurs que ceux (figure 58) car nous avons peu retouché l'enfoncement de cette zone sur l'hémi-face droite avant de procéder à sa symétrisation.

En vue inférieure, le palais a un contour parabolique complet. L'image C de la figure 58 permet de comparer les différences d'alignement des arcades dentaires droite et gauche des deux versions. Alors que les dents du côté droit se superposent, celles de gauche sont plus décalées vers l'extérieur postérieurement.

Le torus frontal est complet, sans rupture au niveau de l'arcade orbitaire gauche. La superposition des deux faces (image B, figure 58) permet de constater que sur la reconstitution Arago1981, le torus sus-orbitaire gauche était plus relevé latéralement par rapport à celui de droite. L'écaille frontale est plus redressée (image A, figure 58) sur la nouvelle reconstitution Arago3D avec un bregma plus antérieur et plus haut.

La largeur de l'écaille frontale cérébrale est différente. L'écaille d'Arago3D est plus divergente que celle de la précédente reconstitution car nous n'avons que peu rabattu vers l'intérieur le bord de l'écaille de la fosse temporale du frontal (vues C et D de la figure 58).

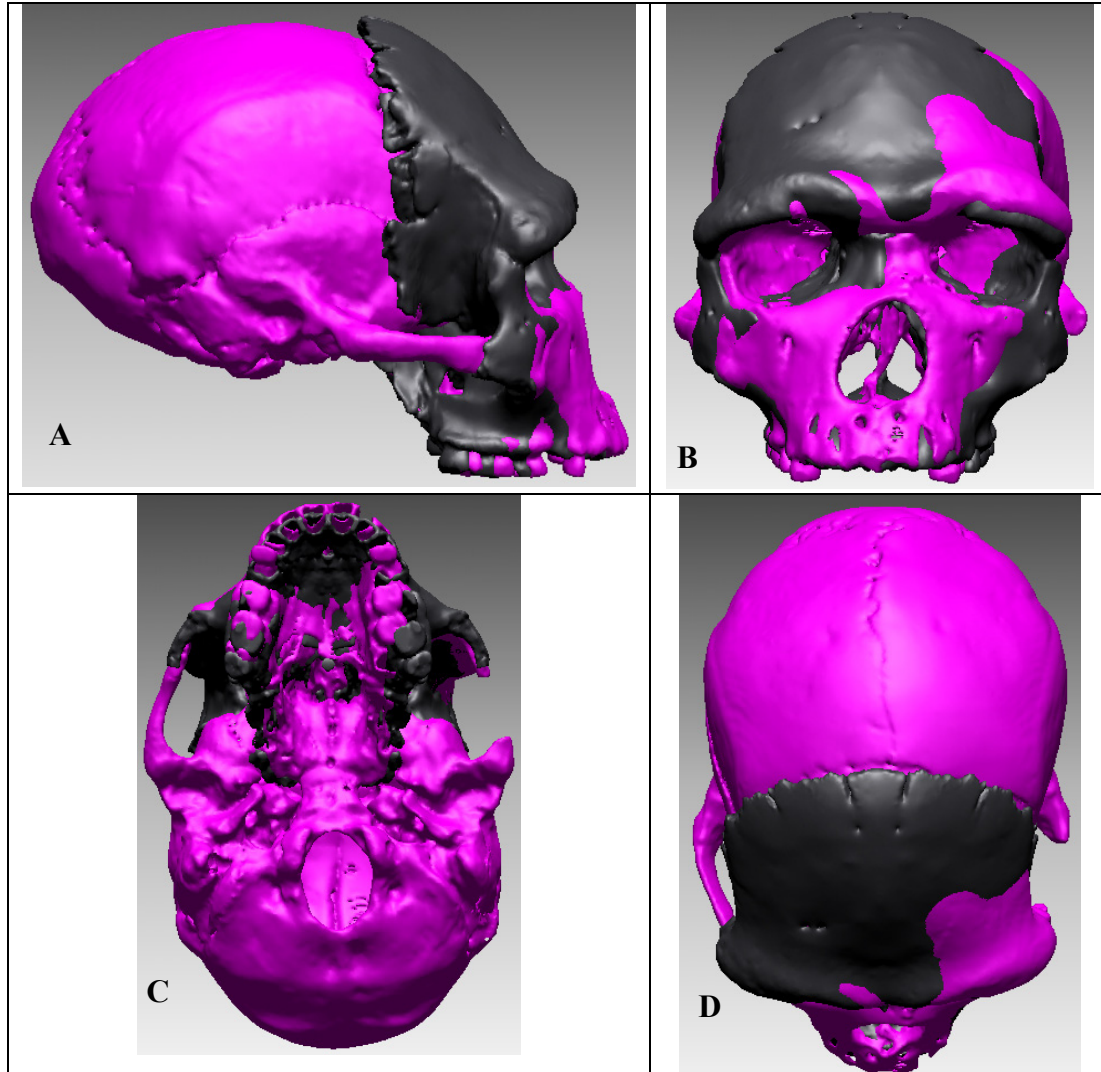


Figure 58 : Comparaison des deux reconstitutions d'Arago 21-47 (en noir, restauration de la face Arago3D) en vues : A : latérale droit ; B : de frontale ; C : inférieure ; D : supérieure.

IV.3.1.2 Différences métriques entre Arago3D et Arago1981

La face Arago3D est plus haute (corde bregma – prosthion) et plus large (largeurs bijugale, bisphénique, M^3-M^3) que celle de la proposition Arago1981 en raison du relèvement et de l'étirement de l'écaille frontale ainsi que de la compensation de la fracturation et de la rotation de l'hémi-face gauche.

L'allongement de l'écaille est caractérisé par l'accroissement des valeurs des cordes bregma – nasion et bregma – glabellum ainsi que des arcs correspondants. Les différents

angles sagittaux de l'écaille s'accroissent de quelques degrés, soulignant l'allongement de l'écaille. La réduction de la courbure de l'écaille frontale cérébrale (M32.5) est liée à cet éloignement du bregma par rapport au nasion et au métopion.

Les largeurs caractéristiques de l'écaille frontale cérébrale sont accrues : largeurs frontales minimale et maximale, bistéphanique et bisphénique. Alors que les valeurs des arcs et des cordes de l'écaille augmentent de quelques millimètres (2 à 5), les différentes largeurs de l'écaille s'accroissent de près d'un centimètre (7 à 11,2). L'accroissement moindre (3,5 mm) de la largeur générale du torus orbitaire (M43') contribue à réduire la constriction post-orbitaire (I72') et à obtenir une écaille plus divergente (I12) que celle de la reconstruction Arago1981. La réduction de l'angle sphénion – stéphanion – bregma est lié à un élargissement de l'écaille supérieur à la valeur d'élévation du bregma.

Les différentes mesures prises au niveau de la face correspondent à un léger élargissement de celle-ci (largeurs FMT-FMT, bijugale, biorbitaire interne, zygomaxillaire), avec un écart de plus en plus grand vers la partie inférieure (2,2 à 6,7 mm). Cet accroissement des mesures prises sur notre proposition par rapport à la précédente est plus marqué au niveau des héli-arcades dentaires supérieures. L'écart entre les M^2 - M^2 augmente de 5,5 mm et atteint 10 mm entre les M^3 - M^3 .

Nous regroupons dans le tableau 13 différentes mesures virtuelles relevées sur les deux reconstitutions comparées d'Arago 21-47.

Tableau 13 : Mesures virtuelles réalisées sur la face des reconstitutions Arago3D et Arago1981 (points craniométriques selon Martin *et al.*, 1957).

Mesures		Reconstitution H & M.-A. de Lumley, 1981	Reconstitution personnelle Arago3D	Différence par rapport à 1981
Corde B-Na	M29	103,3 mm	105,2 mm	+2,9 mm
Arc B-Na	M26	116,1 mm	121,8 mm	+5,7 mm
Corde Gl-B	M3	104,8 mm	105,1 mm	+0,3 mm
Arc Gl-B		107,4 mm	110,6 mm	+3,2 mm
Largeur bijugale		123,7 mm	126,9 mm	+3,2 mm
Largeur FMT-FMT	M43	122,1 mm	125,3 mm	+3,2 mm
Largeur biorbitaire interne		111,7 mm	115,2 mm	+3,5 mm
Largeur du torus orbitaire	M43'	126,6 mm	130,1 mm	+3,5 mm
Largeur frontale minimale	M9	105 mm	112 mm	+7 mm
Constriction post-orbitaire (M9/M43')*100	I72'	82,9	86,1	+3,2
Largeur frontale maximale	M10	109,4 mm	120,6 mm	+11,2 mm
Divergence de l'écaille (M9/M10)*100	I12	96	92,9	-3,1
Largeur bistéphanique	M10b	104,6 mm	114,7 mm	+10,1mm
Largeur bisphénique		102,8 mm	109,9 mm	+7,1 mm
Angle frontal B-M-Na	M32.5	142,9°	145,3°	+2,4°
Angle frontal B-M-G		153,1°	154,4°	+1,3°
Angle Sphn-B-Sphn		73,8°	71,2°	-2,6°
Angle Sphn-St-B		127,4°	119°	-8,4°
Largeur zygomaxillaire	M46	111 mm	117,7 mm	+6,7 mm
Corde M ² -M ²		45 mm	50,5 mm	+5,5 mm
Corde M ³ -M ³		48,8 mm	58,8 mm	+10 mm
Corde B-Pr		181,1 mm	185,9 mm	+ 4,8 mm

IV.3.2 Comparaison des voûtes bipariétales des reconstitutions Arago3D et Arago1981

IV.3.2.1 Différences anatomiques entre la voûte bipariétale d'Arago3D et celle d'Arago1981

Le changement de configuration de la reconstitution de la face Arago 21 a entraîné une articulation et un positionnement différent du pariétal droit (Arago 47 et 47A). Celui-ci est plus excentré et plus relevé au niveau de l'astérion (figure 59) sur notre proposition de reconstruction virtuelle Arago3D.

La suture sagittale est droite, rectiligne, sans convexité (figure 60). La courbure sagittale est moindre (vues B et E, figure 59). Le bord inférieur de l'os pariétal (suture temporale) est plus horizontal (vue B, figure 59). La largeur pariétale maximale (voûte

bipariétale) est accrue en raison du nouveau positionnement de l'os. Cette largeur maximale est plus haute et plus postérieure que sur la précédente reconstitution, Arago1981.

Le pariétal est plus antérieur que précédemment (vue B, figure 59) en raison de la modification de la face.

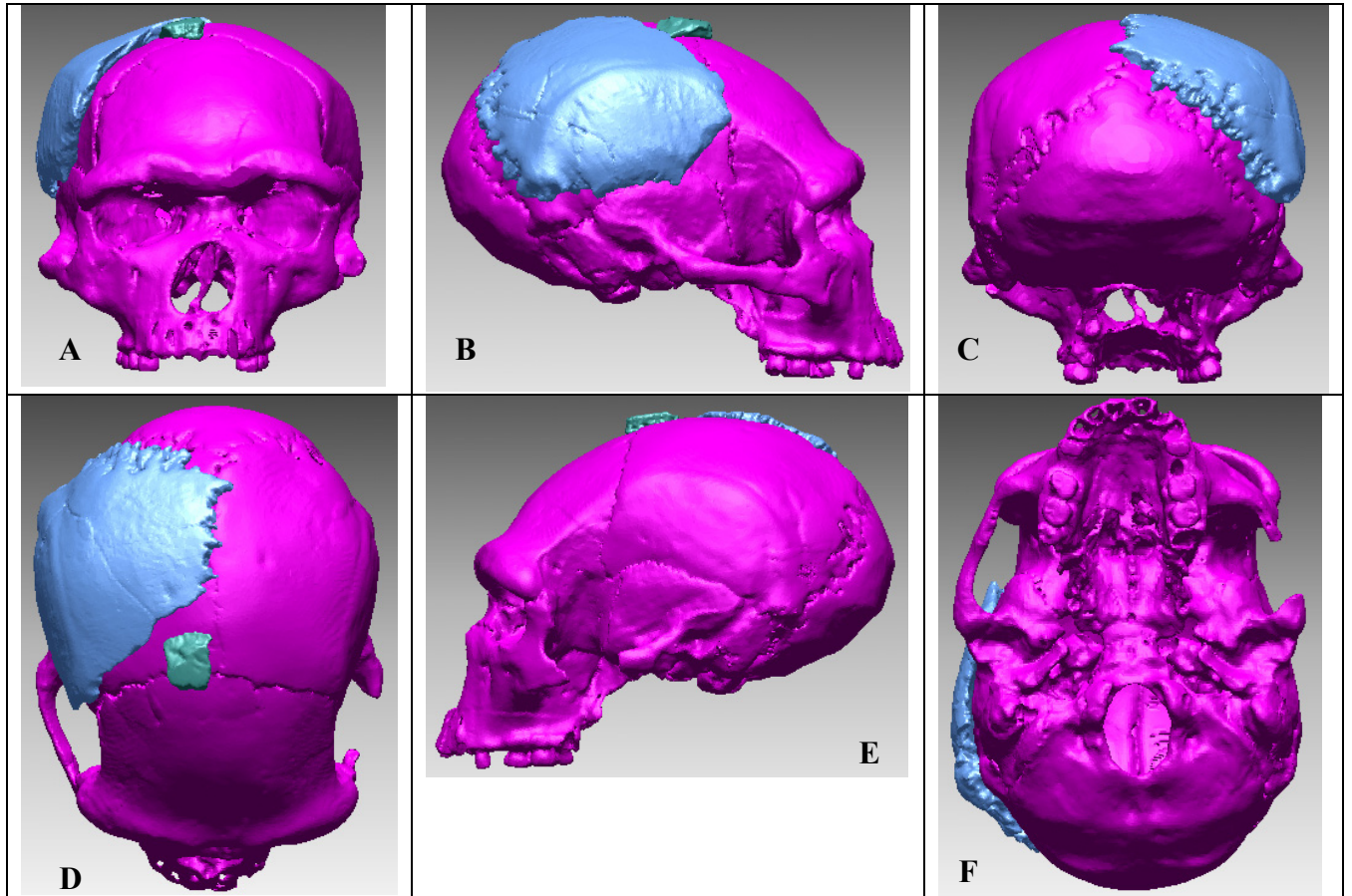


Figure 59 : Comparaison des pariétaux droits des deux reconstitutions d'Arago 21-47 (crâne Arago1981 ; En bleu, position d'Arago 47 et 47A dans la reconstitution Arago3D). Différentes vues : A : frontale ; B : latérale droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : latérale gauche ; F : inférieure.

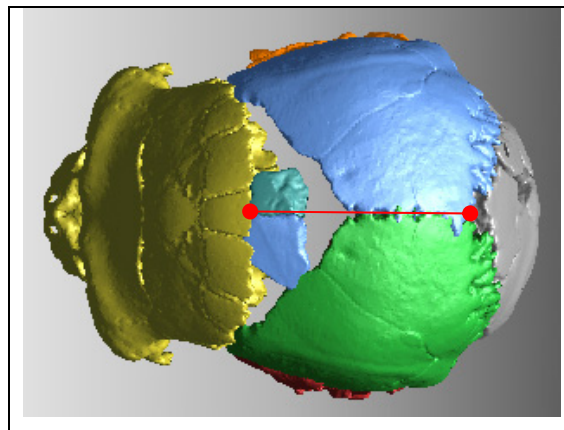


Figure 60 : Modélisation de la suture sagittale sur la nouvelle reconstitution Arago3D.

Latéralement, la ligne temporale est plus haute que sur la reconstruction Arago1981, mais toujours dans la continuité de la crête temporale du frontal, sans discontinuité du type de celle de Kabwe (Broken Hill 1). Le pariétal est plus élevé postérieurement, entraînant une modification de l'angle astérion – lambda – astérion. Ceci réduit l'angulation sagittale entre les deux pariétaux (figure 61).

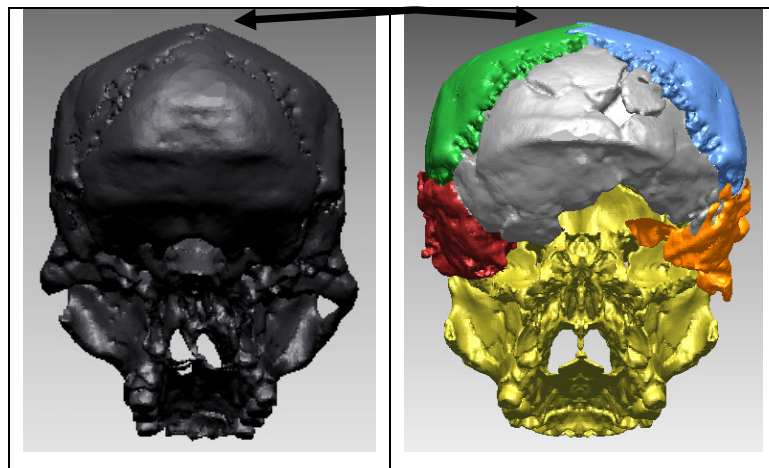


Figure 61: Réduction de l'angulation sagittale pariétale entre la reconstruction Arago1981 à gauche et Arago3D à droite.

Cette nouvelle articulation entraîne un bombement bilatéral de la voûte bipariétale, un positionnement plus élevé de la partie postérieure (lambda), mais aussi une réduction de la hauteur de celle-ci.

IV.3.2.2 Différences métriques entre la voûte bipariétale d'Arago3D et celle d'Arago1981

Le nouveau positionnement des fragments postérieur et antérieur du pariétal droit (Arago 47 et Arago 47A) nécessite une réduction de la lacune entre eux. En effet, alors que la corde bregma - lambda est de 101,9 mm dans la reconstitution de 1981, elle n'est plus que de 97,9 mm pour Arago3D, soit 4 mm de moins (tableau 14).

La réduction de la corde sagittale et l'accroissement de l'angle bregma – sagittum – lambda, correspondent à une voûte bipariétale moins courbée antéro-postérieurement. La valeur de l'arc sagittal n'a pas été relevée virtuellement en raison de la lacune entre les fragments de la nouvelle proposition. Le rapport entre la corde temporale et la corde sagittale correspond à un nouveau pariétal avec des bords inférieurs et supérieurs presque de la même longueur alors que la corde sagittale était prédominante sur la proposition de 1981.

L'étude des cordes sphénion – bregma et lambda – astérion permet de dire que le pariétal droit de la proposition Arago1981 a un aspect divergent postérieurement. Suivant ces mesures, ainsi que les valeurs des cordes sagittale et temporale, la nouvelle articulation donne un aspect moins divergent postérieurement au pariétal droit.

Ceci est dû en grande partie au relèvement de la partie postérieure externe (astérion) de l'os, ce qui contribue à réduire la carène sagittale constatée postérieurement sagittale entre les os pariétaux droit et symétrique gauche.

Ce mouvement d'élévation de l'astérion appliqué à l'écaille, entraîne un accroissement des différentes largeurs (biastérique, bipariétale maximale) qui se répercute sur l'angle astérion – lambda – astérion.

Tableau 14 : Mesures virtuelles réalisées sur la face et la voûte bipariétale des reconstitutions Arago3D et Arago1981 (points craniométriques selon Martin *et al.*, 1957).

Mesures		Reconstitution H & M.-A. de Lumley, 1981	Reconstitution personnelle Arago3D	Différence par rapport à 1981
Corde B-La	M30	101,9 mm	97,9 mm	-4 mm
Corde Sphen-As (droit)		94,9 mm	100,4 mm	+5,5 mm
(Corde Sphn-As/M30)*100		93,1	102,5	+9,4
Corde Sphn-B		88,6 mm	93,8 mm	+5,2 mm
Corde La-As (droit)		98,3 mm	95,8 mm	-2,5 mm
Corde La-Na		179 mm	176,1 mm	-2,9 mm
Corde La-Gl		182,9 mm	179,6 mm	-3,3 mm
Largeur entre les bosses pariétales		131,3 mm	139,1 mm	+7,8 mm
Largeur biastérique	M12	116,1 mm	134,6 mm	+18,5 mm
Largeur bipariétale maximale	M8	145 mm	156,9 mm	+11,9 mm
Corde La-Pr		234,4 mm	235,6 mm	+1,2 mm
Angle La-B-Pr		110,2°	110,9°	+0,7°
Angle As-La-As		73,6°	89°	+15,4°
Angle B-Sa-La		144,5°	155,5°	+11°

IV.3.3 Comparaison des reconstructions Arago3D et Arago1981 après intégration virtuelle de l'os occipital et des os temporaux prélevés sur Ceprano 1

Le découpage et l'articulation virtuelle de l'os occipital et des os temporaux de Ceprano 1 ont entraîné un écartement de l'ordre du millimètre entre ces fragments (figure 62). L'occipital s'intègre parfaitement entre les deux os pariétaux d'Arago3D. L'accroissement de l'angle astérion – lambda – astérion permet de ne plus intégrer d'os wormien comme dans la proposition Arago1981. Latéralement, il n'y a pas rupture du contour sagittal entre les os

pariétaux et l'occipital. La largeur maximale de l'os occipital correspond, à quelques millimètres près, à la largeur biastérique. La profondeur de cet os convient aussi, avec terminaison du torus occipital au niveau de l'astérion.

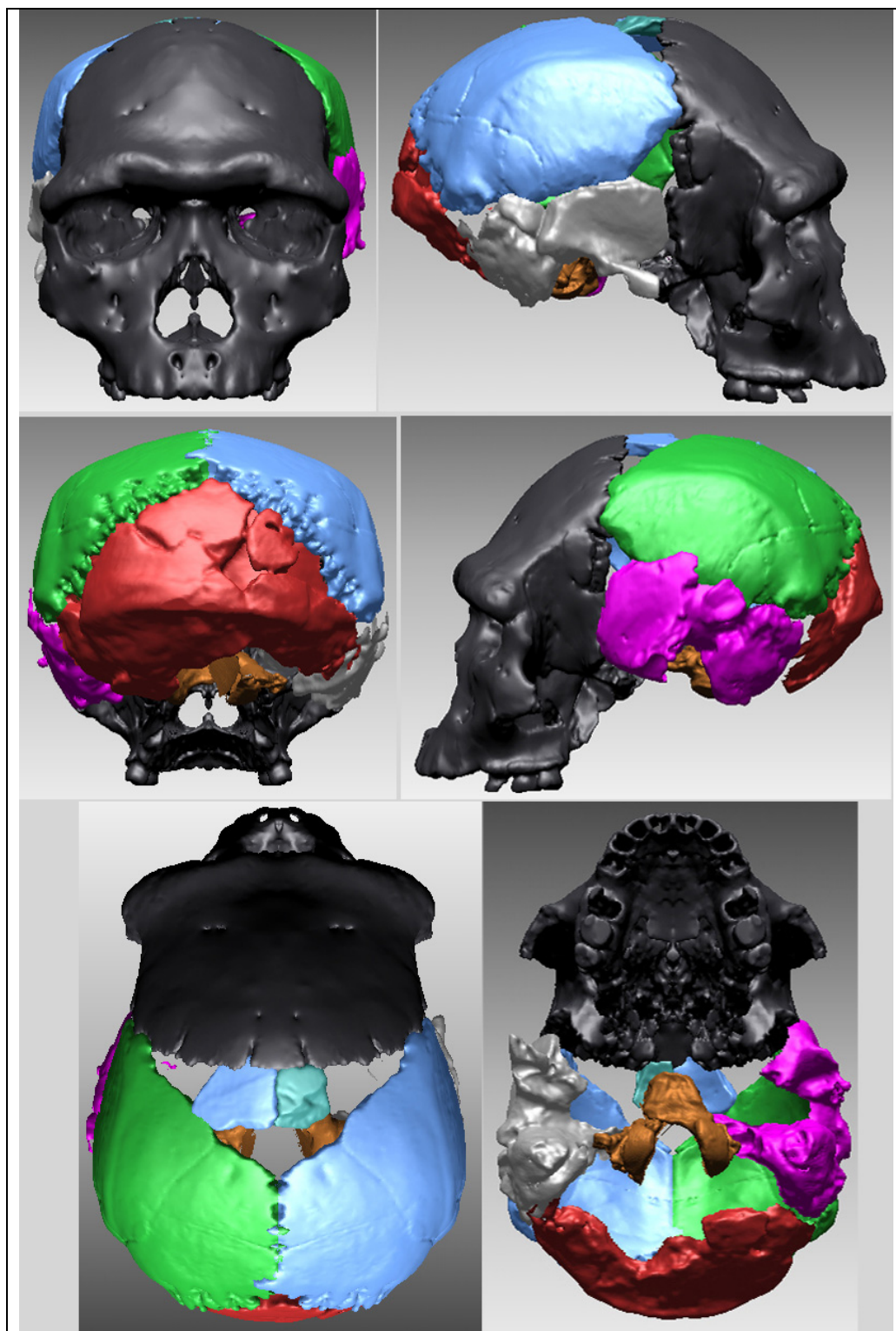


Figure 62 : Différentes vues de notre proposition de reconstruction Arago3D.

Les deux os temporaux s'intègrent et s'articulent parfaitement avec l'os occipital, les os pariétaux et la face de notre proposition Arago3D. L'écaille de l'os temporal gauche recouvre la base de l'os pariétal (suture pariéto-temporal en biseau) tout en jouxtant avec la grande aile du sphénoïde (Arago 21). Ce n'est pas le cas du côté droit en raison du mauvais état de l'écaille correspondante. Par contre, le processus zygomatique de l'os temporal droit est aligné sur le processus temporal de l'os malaire droit (Arago21) et ce aussi bien en vue latérale que supérieure. Le torus angularis des os pariétaux est prolongé par les processus mastoïdiens.

Morphométriquement, la longueur maximale du crâne Arago3D ne diffère que de 3 mm par rapport à la précédente reconstruction Arago1981 (tableau 15). Par contre, la nouvelle largeur maximale est très supérieure (15 mm en plus). Celle-ci se situe au niveau de la suture pariéto-temporale.

L'ajout de la portion antérieure de l'occipital Arago 78-79 avec le basion permet de proposer une hauteur pour le neurocrâne. La hauteur basion – sagittum est plus petite de 7 mm dans notre nouvelle proposition.

Au final notre proposition de crâne Arago3D est plus aplatie que la précédente. Le nouveau crâne présente un aspect plus sphénoïde (MARTIN *et al.*, 1954) en vue supérieure et une section plus circulaire que la précédente qui possédait une section pentagonale. Ceci est dû à un élargissement du crâne au niveau de la jonction pariéto-temporale, dû, quant à lui, à la nouvelle inclinaison des pariétaux.

Tableau 15 : Mesures virtuelles du bloc temporo-occipital relevées sur les deux reconstitutions, Arago3D et Arago1981 (points craniométriques selon Martin *et al.*, 1957).

Mesures	Reconstitution H & M.-A. de Lumley, 1981	Reconstitution personnelle Arago3D	Différence par rapport à 1981
Corde Na-Op	193,1 mm	196 mm	+3,1 mm
Corde Gl-Op	197,5 mm	200 mm	+2,5 mm
Corde Op-Pr	234,5 mm	232,3 mm	-2,2 mm
Angle Na-Ba-La	103,5 °	104°	+0,5°
Hauteur Ba-Sa	122,6 mm	115,6 mm	-7 mm
Hauteur Ba-B	121 mm	118 mm	-3 mm
Largeur biporion	131 mm	136 mm	+5 mm
Largeur maximale	145 mm	160 mm	+15 mm

IV.3.4 Modélisation tridimensionnelle des Complexes Segmentaires Inter Points

Nous comparons (figure 63) les modélisations tridimensionnelles sous forme de Complexes Segmentaires Inter Points des reconstitutions Arago3D et Arago1981.

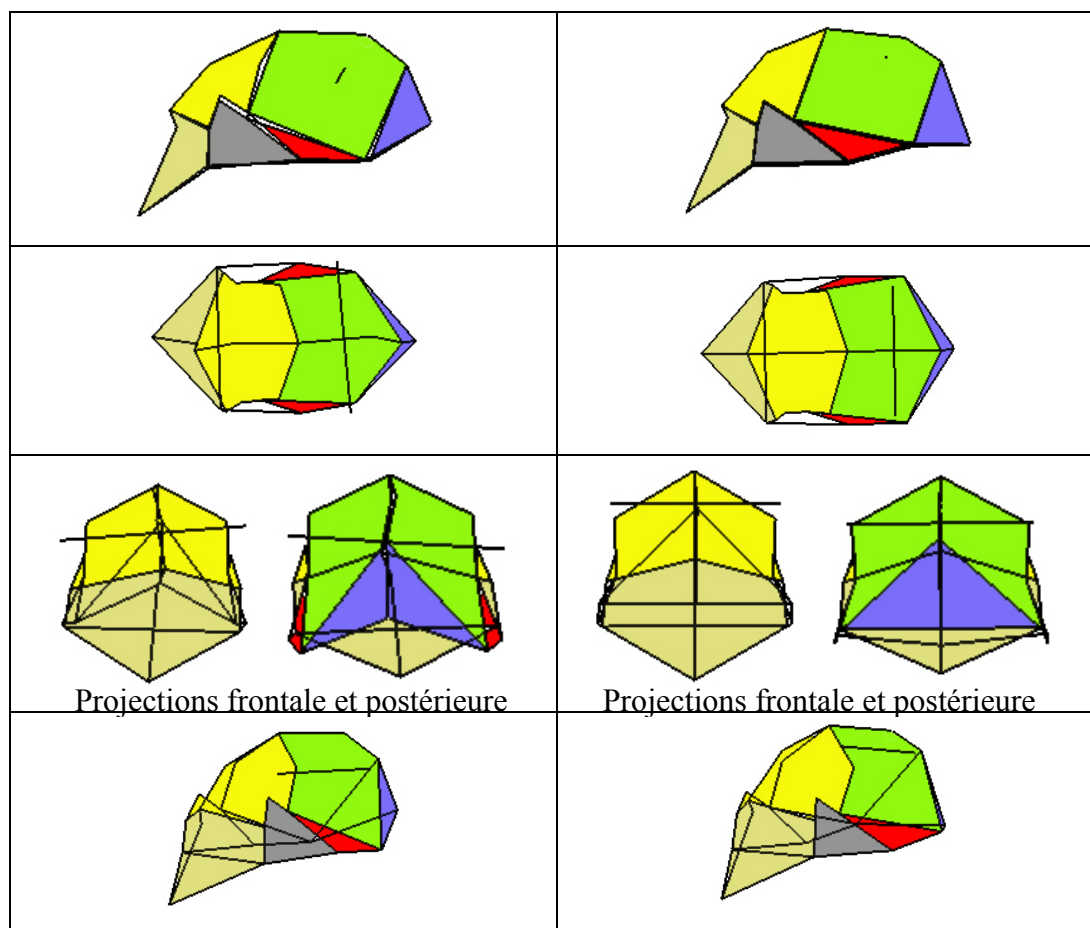


Figure 63 : Différentes vues des deux reconstructions d' Arago 21-47 ; Gauche : Version dirigée par M.-A. de Lumley, Arago1981 ; Droite : Version personnelle, Arago3D.

La nouvelle proposition est plus courbée sagittalement que la précédente. La voûte bipariétale est plus large postérieurement qu'elle ne l'était avant. L'écaille frontale est plus divergente suivant l'axe antéro-postérieur. La face est moins déformée avec un alignement prosthion – nasion – glabellum – bregma – sagittum – lambda. L'opisthocranion est situé plus haut par rapport aux astérions. La nouvelle proposition est plus symétrique que la précédente du fait des différentes opérations informatiques réalisées. La fosse zygomatique apparaît plus réduite dans notre version que sur Arago1981.

IV.3.5 Etude des plans de cassure du crâne Arago3D

Nous estimons qu'il reste à découvrir deux fragments du pariétal droit, l'un correspondant à l'angle sphénique, l'autre correspondant à la lacune entre le bord coronal 47A et l'écaille 47. Ce fragment présenterait un bord antérieur en biseau et un bord postérieur vertical. Comme les deux fragments du pariétal droit ne présentent aucun fragment du pariétal gauche, il semble que le degré de synostose de la suture sagittale d'Arago 21-47 n'était pas assez élevé pour espérer retrouver un morceau de pariétal droit avec un fragment gauche (figure 64).

Nous proposons comme hypothèse, d'après l'axe quasi rectiligne du plan de fracture d'Arago 47 et la forme d'Arago 3A, que le pariétal gauche est fracturé en au moins quatre fragments. Ces quatre fragments correspondraient à : 1/ La partie postérieure de l'écaille (suture lambdatique et suture sagittale) ; 2/ Une portion de l'écaille correspondant au torus angularis et à la bosse pariétale ; 3/ La portion antérieure avec la suture coronale ; 4/ Arago 3A.

Les fragments osseux (wormiens ou occipitaux) subsistant au niveau de la suture lambdatique droite ne suivent pas la même courbure générale de l'écaille pariétale. Ils pourraient témoigner du mouvement de cassure appliqué pour séparer le pariétal de l'occipital, c'est-à-dire une plicature dont la suture lambdatique serait l'axe (figure 65). Les fragments seraient des restes de cette fracturation du crâne.

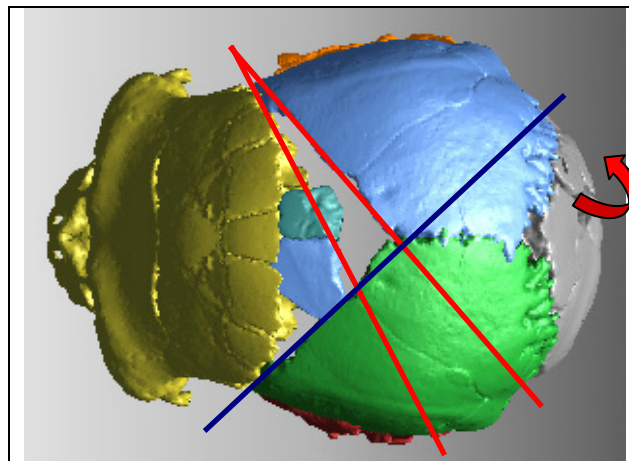


Figure 64 : Axe des différentes cassures subies par les pariétaux d'Arago 21-47.

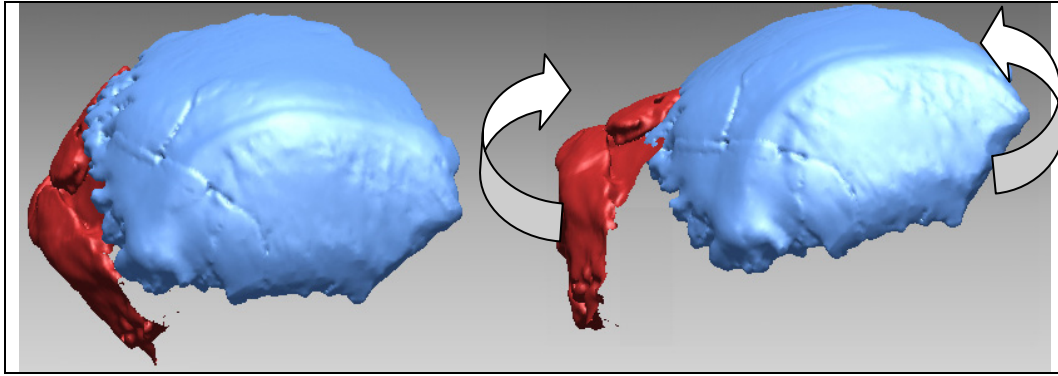


Figure 65 : Hypothèse de fracturation du bloc occipital – pariétal droit Arago 47.

IV.3.6 Comparaison virtuelle de la nouvelle chimère Arago3D avec d'autres Hominidés fossiles

Nous présentons différentes comparaisons virtuelles de notre proposition de reconstruction Arago 3D avec des *Homo heidelbergensis* et/ou Néandertaliens.

Toutes les comparaisons que nous présentons dans ce chapitre ont été réalisées en superposant les crânes dans le plan de Francfort, sans modification de taille des crânes étudiés.

IV.3.6.1 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Petralona

Nous avons comparé virtuellement notre chimère Arago3D avec le crâne de Petralona. Celui-ci est aussi massif et robuste que Arago3D, par rapport à d'autres Hominidés fossiles (Sima de los Huesos 5), mais les deux spécimens d'*Homo heidelbergensis* ont une morphologie différente (figure 66).

Petralona a une face plus haute (prosthion plus bas, hauteur bregma – prosthion de 187,1 mm contre 185,9 mm) et en retrait par rapport à celle d'Arago3D. Le torus frontal est beaucoup plus antérieur avec une forte dépression supraglabellaire et une grande avancée glabellaire pour Petralona. La largeur minimale de l'écaille frontale de Petralona est moindre (109,7 mm contre 112 mm pour Arago3D). La face de Petralona est plus large au niveau des cavités orbitaires (largeur entre les points fronto-malaires temporaux de 129 mm contre 125,3 mm pour notre proposition), des points jugaux et du maxillaire.

Le profil sagittal de Petralona (figure 67) correspond à un crâne plus allongé (vue supérieure ; corde nasion – opisthocranion de 179,6 mm contre 176,1 mm pour notre chimère Arago3D) ayant une largeur maximale très basse (au niveau des os temporaux).

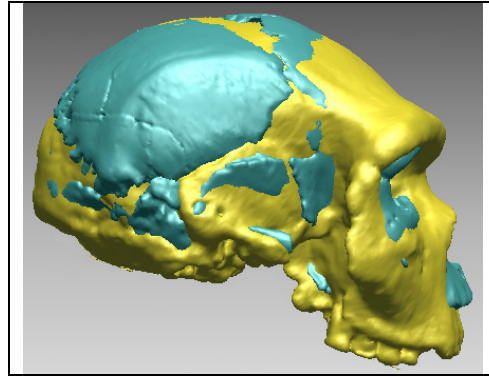


Figure 66 : Superposition virtuelle du crâne de Petralona et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.

Nous observons également une forte avancée de la zone glabellaire. Notre proposition est plus courbée sagittalement que Petralona. L'utilisation de l'occipital de Petralona aurait impliqué d'ouvrir davantage l'angle occipital (astérion – lambda – astérion) qui est de 92° chez Petralona et de 89° pour notre chimère Arago3D. Ceci aurait alors accentué les différences entre ces deux individus. En effet, nous observons en coupe frontale que Arago3D présente une voûte bipariétale légèrement plus large que celle de Petralona.

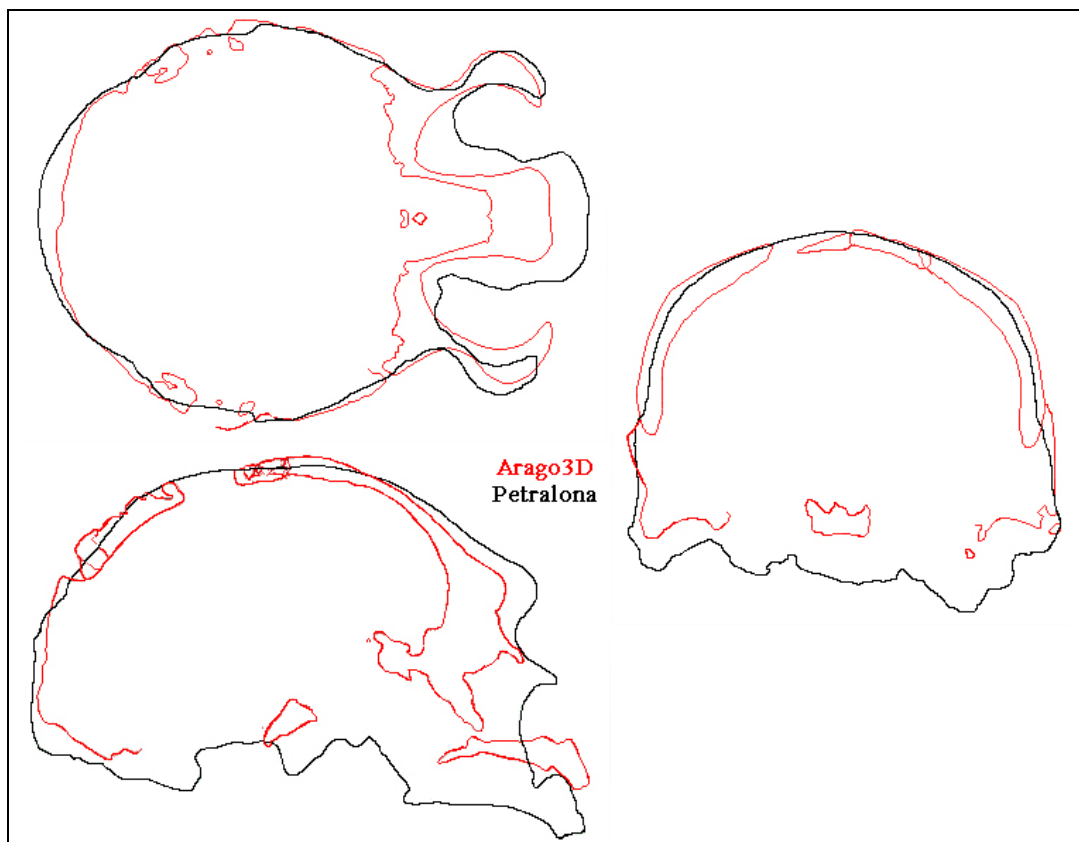


Figure 67 : Superposition des profils crâniens de Petralona et de notre reconstruction Arago3D en vue supérieure, sagittale et frontale.

IV.3.6.2 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Kabwe

Nous avons comparé notre reconstruction à un autre *Homo heidelbergensis*, Kabwe (figure 68). Comme Petralona, ce spécimen a un aspect massif. Kabwe présente le même type de différences avec notre proposition que celles constatées entre Petralona et Arago3D. Kabwe présente une corde opisthocranion – nasion supérieure à celle de notre proposition (197,2 mm contre 196 mm). La face est plus haute (bregma – prosthion = 193,1 mm) que celle d'Arago3D (185,9 mm), plus large au niveau des points frontaux malaires temporaux (128 mm contre 125,8 mm) et des points jugaux, et présente un aspect moins prognathe suivant le plan de Francfort.

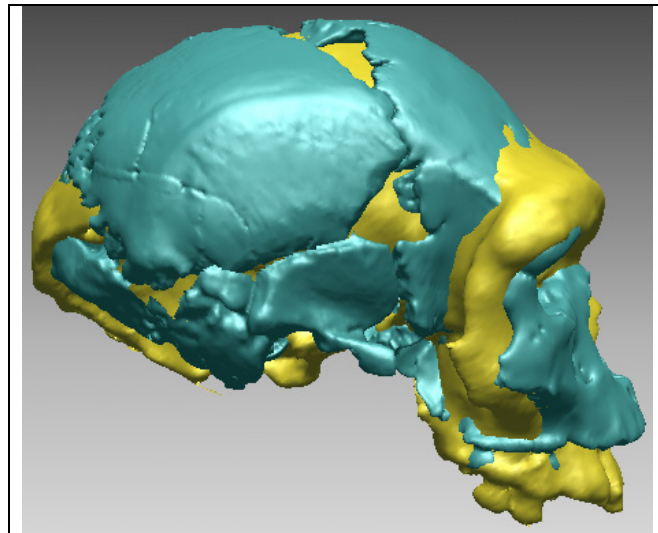


Figure 68 : Superposition virtuelle du crâne de Kabwe et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.

L'écaille frontale est plus fuyante que celle d'Arago3D (coupe sagittale, figure 69). La glabellule de Kabwe est antérieure. La largeur maximale de Kabwe est également basse en coupe frontale. Kabwe présente un chignon occipital tout comme Petralona. Par contre l'angle astérion – lambda – astérion est plus faible que celui d'Arago3D et de Petralona (82° après reconstruction de l'astérion droit). La voûte bipariétale symétrisée d'Arago3D est plus large et plus haute que celle de Kabwe.

La morphologie de Kabwe est ainsi très différente de celle de notre proposition de reconstruction pour Arago.

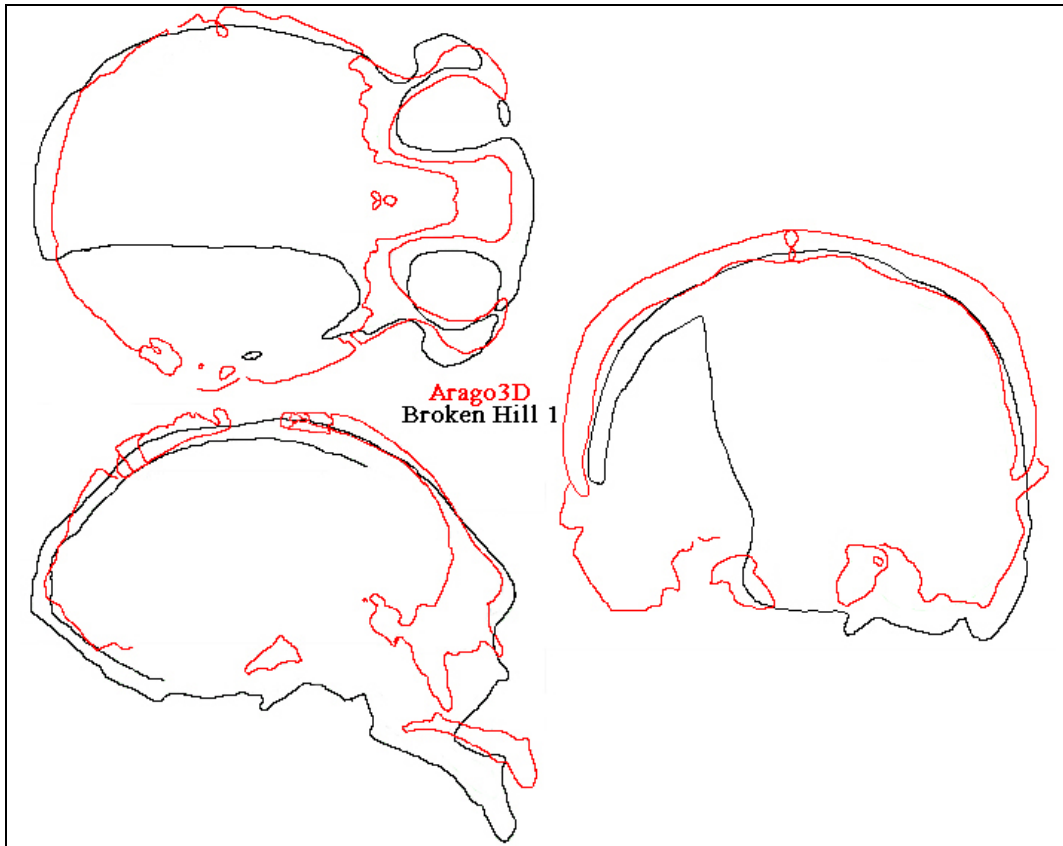


Figure 69 : Superposition des profils crâniens de Kabwe (Broken Hill 1) et de notre reconstruction Arago3D en vue supérieure, sagittale et frontale.

IV.3.6.3 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Bodo 1

Ce troisième *Homo heidelbergensis*, assez fragmentaire présente, comme les deux autres individus étudiés, une face plus allongée que celle d'Arago3D (figures 70 et 71).

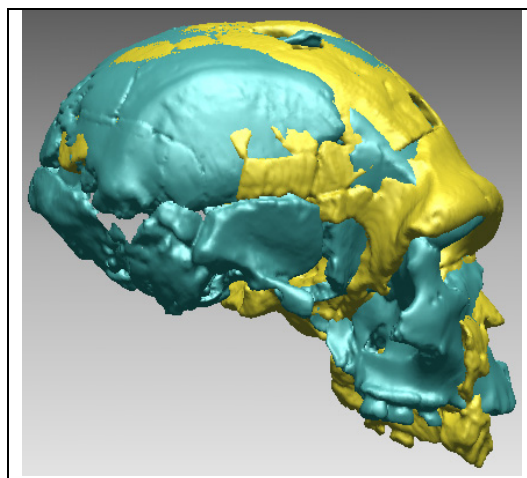


Figure 70 : Superposition virtuelle du crâne de Bodo 1 et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.

La face est également en retrait en projection sagittale par rapport au maxillaire d'Arago3D. Le torus frontal est plus proéminent et plus large que celui d'Arago3D. Le contour sagittal de la voûte bipariétale est identique à celui de notre proposition, à l'exception d'une carène sagittale bregmatique, et d'une largeur accrue de la voûte bipariétale au niveau des lignes temporales par rapport à Arago 47 et son image (figure 71, vues latérale et frontale).

Sur les portions conservées, Bodo 1 a une largeur moindre que notre reconstitution Arago3D en coupe frontale.

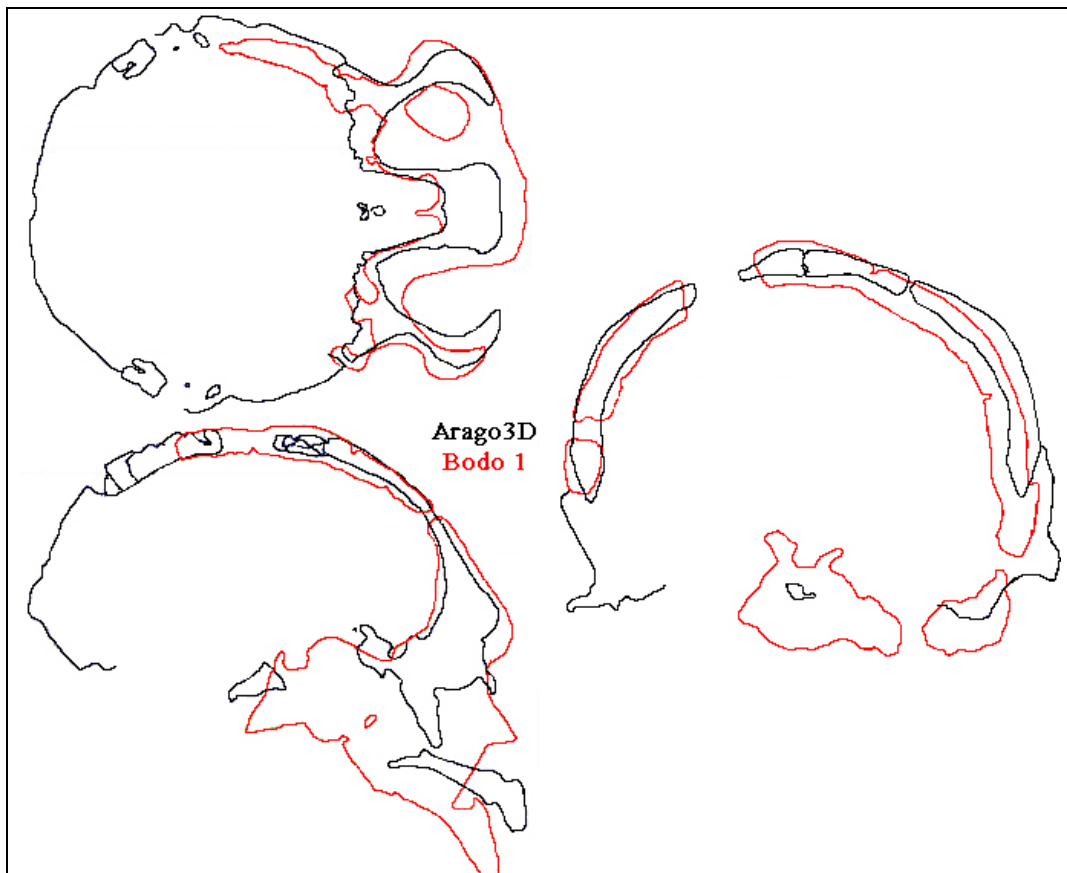


Figure 71 : Superposition des profils crâniens de Bodo 1 et de notre reconstruction Arago3D en vue supérieure, sagittale et frontale.

Les trois *Homo heidelbergensis* comparés avec notre proposition de chimère Arago3D sont dans l'ensemble plus allongés (supposition pour Bodo 1) avec une avancée du torus frontal et de la zone glabellaire. Ils présentent une face plus étirée verticalement (distance bregma – prosthion supérieure à celle relevée pour Arago 21) et plus large au niveau du torus frontal et des points jugaux (Petalona et Kabwe).

IV.3.6.4 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Sima de los Huesos 5

Ce dernier *Homo heidelbergensis* étudié présente des valeurs morphométriques et des caractères morphologiques très différents des trois précédents individus et paraît plus proche morphologiquement de notre proposition. Contrairement aux trois autres fossiles, le maxillaire de Sima de los Huesos 5 est presque totalement superposable à celui d'Arago 3D dans le plan de Francfort (figure 72). Les faces de ces deux individus ne présentent presque pas de différences de taille au niveau jugal et au niveau des arcades orbitaires (moins de 1 mm d'écart). L'écaille frontale d'Arago 21 diverge postérieurement davantage que celle de Sima de los Huesos 5 (114,7 mm contre 100,5 mm pour la largeur bistéphannique). Ceci se retrouve au niveau des coupes des deux individus en vue supérieure.

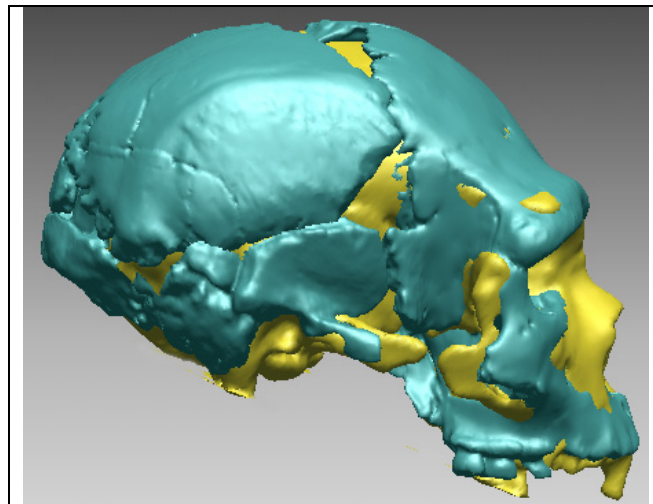


Figure 72 : Superposition virtuelle du crâne de Sima de los Huesos 5 et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.

La coupe sagittale (figure 73) permet de mettre en évidence une similarité de courbure de la base de l'écaille frontale cérébrale puis une divergence, avec une écaille plus fuyante pour Sima de los Huesos 5 en se rapprochant du bregma. Sagittalement, la voûte bipariétale de cet individu est plus courbée que celle de notre proposition Arago3D. Le crâne paraît ainsi plus court (corde bregma – opisthocranion de 176,4 mm contre 196 mm pour notre proposition). En vue frontale, Sima de los Huesos 5 présente une section plus pentagonale avec une angulation plus marquée entre les portions antérieure et postérieure de l'écaille pariétale.

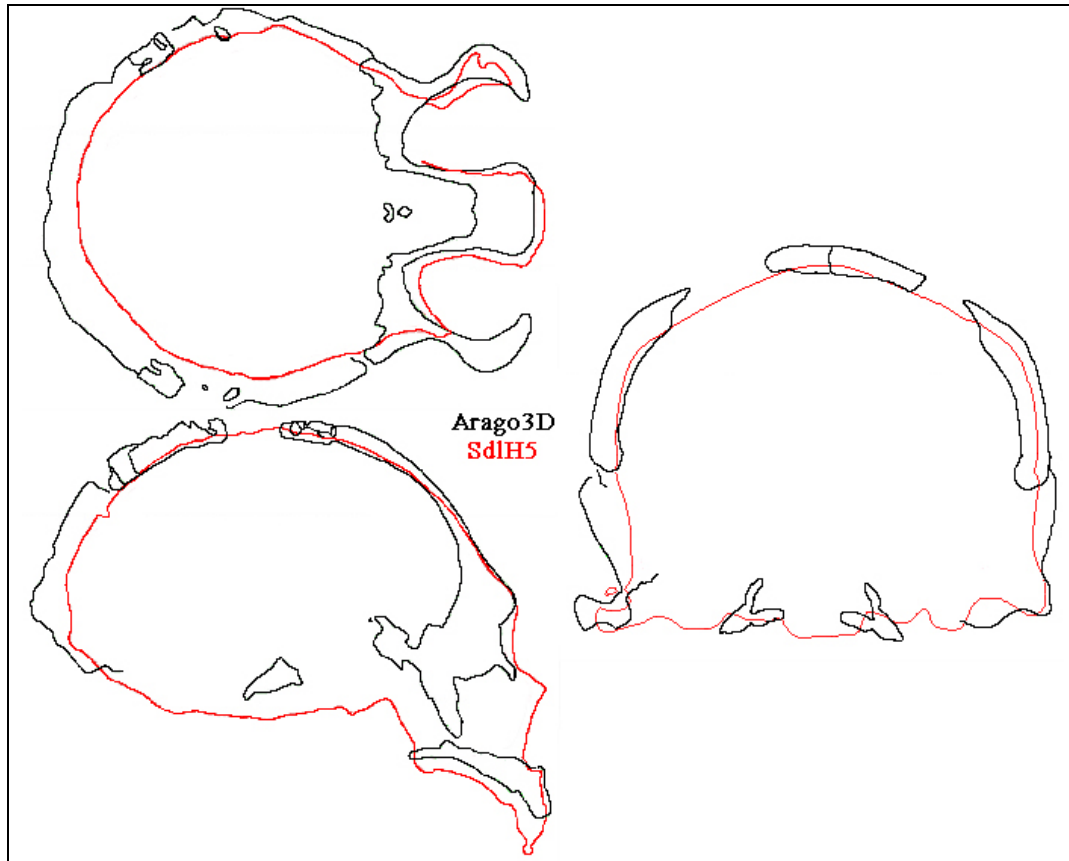


Figure 73 : Superposition des profils crâniens de Sima de los Huesos 5 et de notre reconstruction d'Arago en vue supérieure, sagittale et frontale.

Notre proposition présente une morphologie générale plus proche de ce spécimen d'*Homo heidelbergensis* que des trois autres étudiés précédemment.

IV.3.6.5 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec la calotte crânienne de Ceprano 1

Nous avons comparé notre proposition de reconstruction à la calotte crânienne de Ceprano 1 pour savoir si les ressemblances constatées avant la reconstruction ont été conservées, compensées ou accrues.

Les lignes temporales des deux individus présentent les mêmes tracés, sont autant marquées et robustes et se prolongent par un torus angularis important (figure 74). Les seules divergences proviennent d'une zone glabellaire plus antérieure pour Ceprano 1 et de cavités orbitaires plus ouvertes latéralement que celles d'Arago3D.

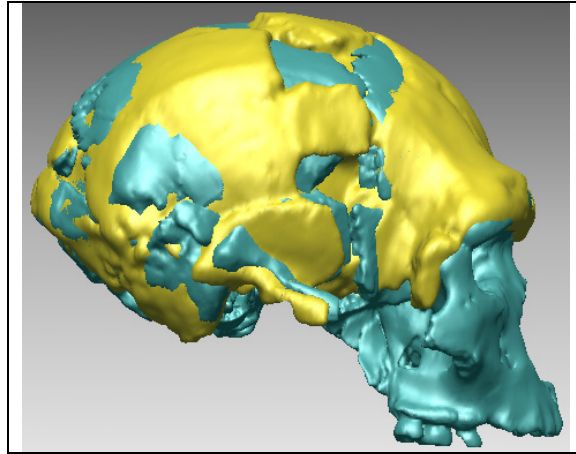


Figure 74 : Superposition virtuelle de la calotte crânienne de Ceprano 1 et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.

La superposition des profils sagittaux (figure 75) des deux individus permet de mettre en évidence une similitude de courbure de l'écaïlle frontale cérébrale (avec un métopion légèrement plus antérieur pour Ceprano 1). La voûte bipariétale de Ceprano 1 n'est pas préservée sagittalement mais la superposition avec le profil d'Arago3D paraît complémentaire jusqu'au niveau de l'os occipital.

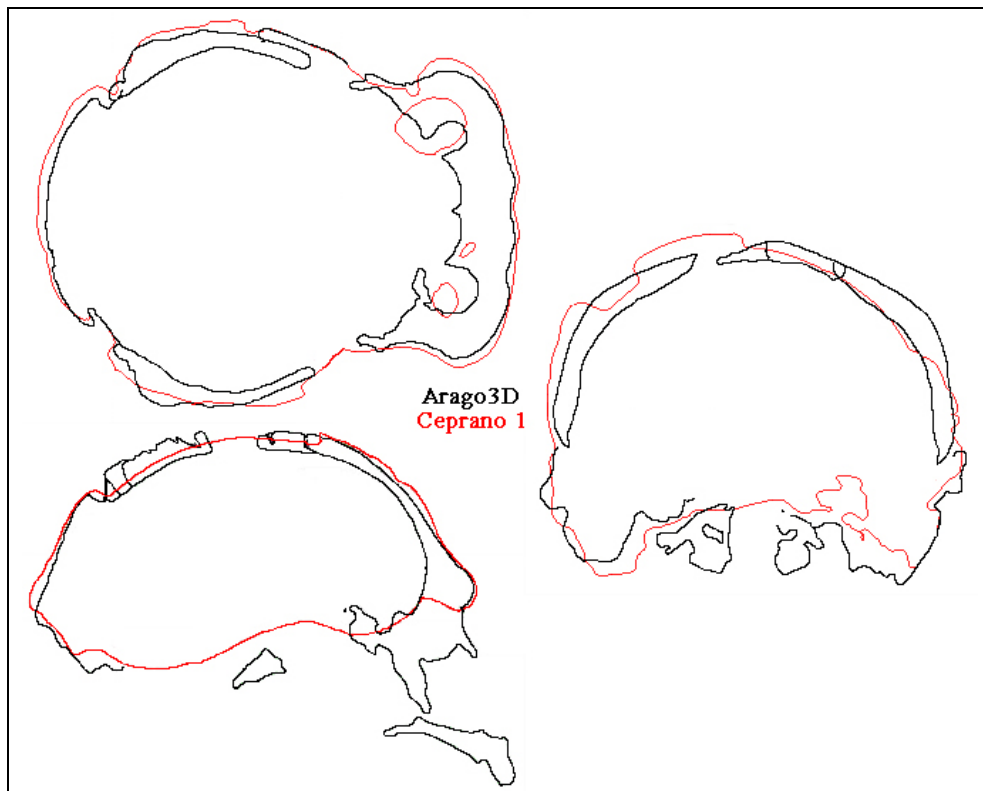


Figure 75 : Superposition des profils crâniens de Ceprano 1 et de notre reconstruction d'Arago en vue supérieure, sagittale et frontale.

Les contours crâniens de Ceprano 1 et de notre proposition d'Arago se superposent presque parfaitement dans les différents plans de superposition (particulièrement la vue sagittale et la vue supérieure).

Une seule différence apparaît au niveau de la coupe frontale avec une voûte bipariétale pour Ceprano 1 légèrement plus large au niveau des lignes temporales et un sommet de voûte un peu plus haut.

IV.3.6.6 Articulation virtuelle du crâne Arago3D avec l'hémi-mandibule droite Arago 13

Nous avons intégré l'hémi-mandibule droite Arago 13 (découverte en juillet 1970 dans le sol G de la Caune de l'Arago) à notre proposition de reconstruction Arago3D (figure 76). Nous avons symétrisé séparément l'hémi-mandibule droite avant de la positionner en occlusion avec notre version restaurée d'Arago 21.

En raison d'une mauvaise numérisation tomодensitométrie par rayonnement X de l'original, nous n'avons pas pu dissocier totalement le matériel osseux de son support. Le condyle mandibulaire droit est mal modélisé. Cependant nous pouvons positionner le condyle mandibulaire droit à proximité de la cavité glénoïde de l'os temporal droit de Ceprano 1 (seule cavité glénoïde préservée et présente sur la reconstitution virtuelle Arago3D).

Nous constatons que les courbures du maxillaire restauré d'Arago3D et de la mandibule symétrisée sont semblables.

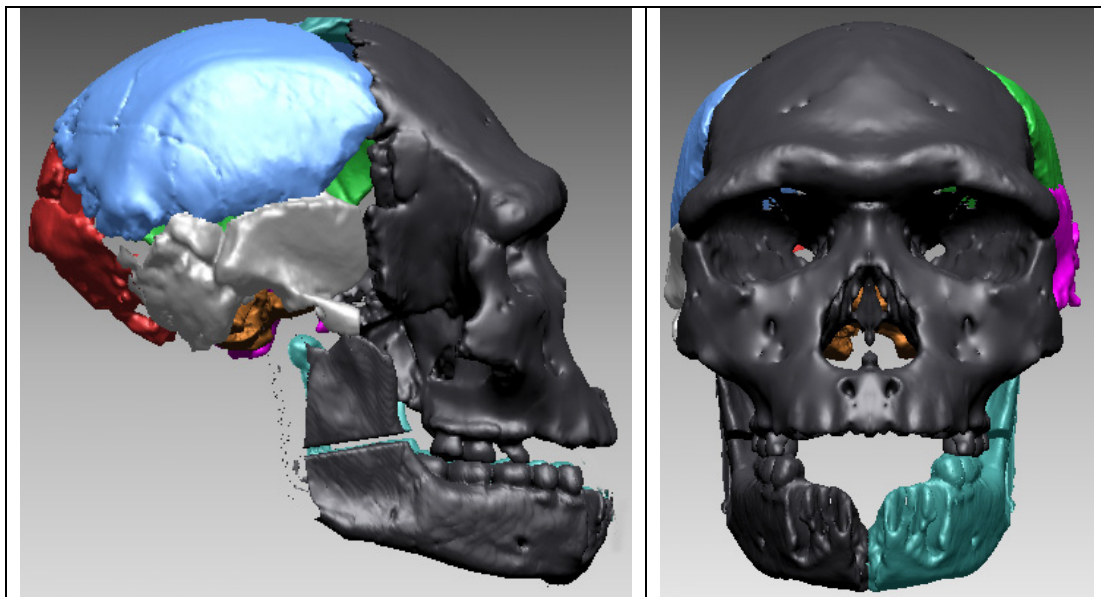


Figure 76 : Intégration virtuelle de l'hémi-mandibule (noir) Arago 13 symétrisée, à notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale droit et frontale.

Chap. V : Etude Paléoanthropologique et Reconstruction Virtuelle du Crâne de Biache-Saint-Vaast 2

Après description des fragments inédits du deuxième individu mis au jour à Biache-Saint-Vaast (BSV 2), nous proposerons une reconstruction virtuelle de celui-ci.

V.1 Inventaire et descriptions des pièces osseuses attribuées à Biache-Saint-Vaast 2

Les restes fragmentaires de cet individu (BSV 2) correspondent à la portion antérieure de l'occipital, au temporal gauche, à un fragment de la face temporale de la grande aile sphénoïde gauche, à la partie inféro-postérieure de l'os pariétal gauche, et au torus supra-orbitaire avec la base de l'écaille frontale cérébrale. Ces pièces proviennent de la couche IIa (TUFFREAU, 1988). Les fragments ont été attribués à un deuxième spécimen en raisons :

- 1/ D'une différence de robustesse des spécimens (BSV 1 est plus gracile) ;
- 2/ De la présence d'un os temporal gauche et de la partie postéro-inférieure de l'écaille pariétale sur les deux individus ;
- 3/ De la présence des fragments attribués à BSV 2 dans le même carré de fouille, différent de celui de BSV 1.

V.1.1 L'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2

Seul le torus supra-orbitaire et la base de l'écaille frontale cérébrale ont été conservés. Latéralement, la portion frontale des sutures fronto-malaires est intacte. Il ne subsiste que la partie médiane de la suture naso-frontale qui présente un aspect en pointe (figure 77) avec le nasion au sommet. La suture entre les os propres du nez n'est plus visible entre les fragments supérieurs de ces deux os fusionnés sur les 5 millimètres conservés. L'espace inter-orbitaire restant mesure 23 mm. La suture métopique est entièrement résorbée sur les portions conservées.

V.1.1.1 La face exocrânienne de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2

L'arcade sourcilière droite est manquante. Celle de gauche, totalement soudée, permet de dire que le torus est de type III selon la classification de Cunningham (1908). Le caractère massif de ce torus est accentué par l'absence du reste du crâne (figure 77).

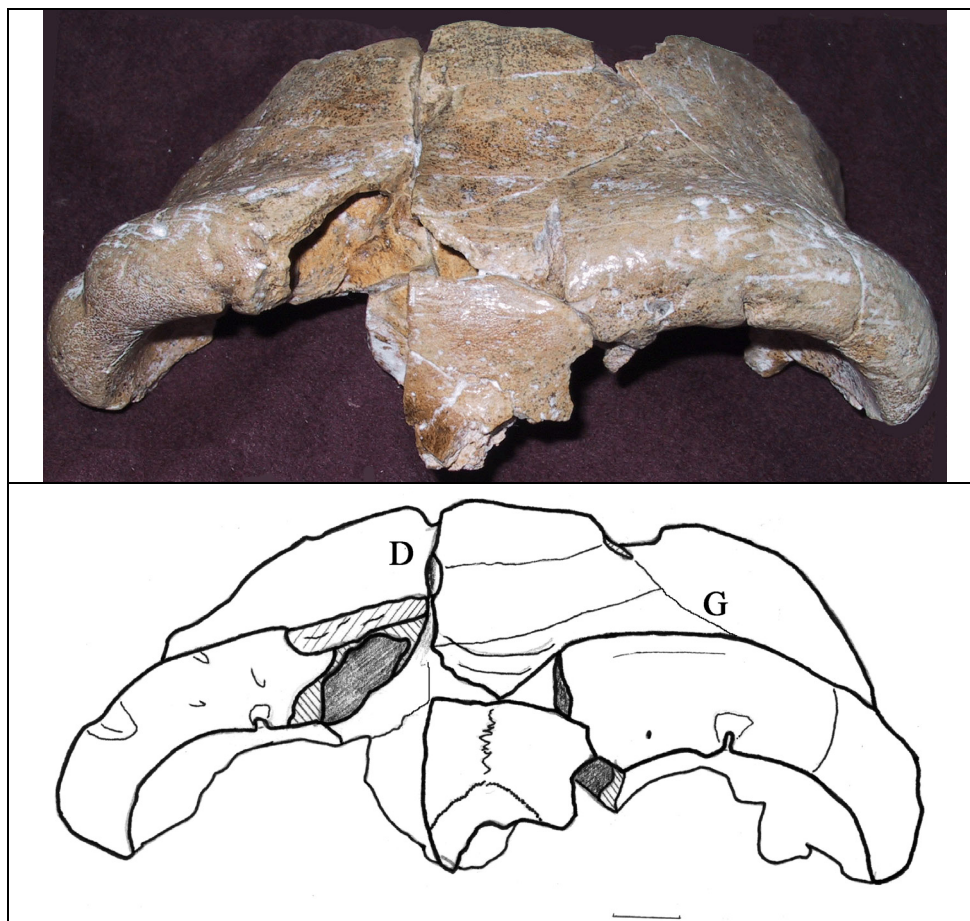


Figure 77 : Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vue antérieure ; Echelle : 10 mm.

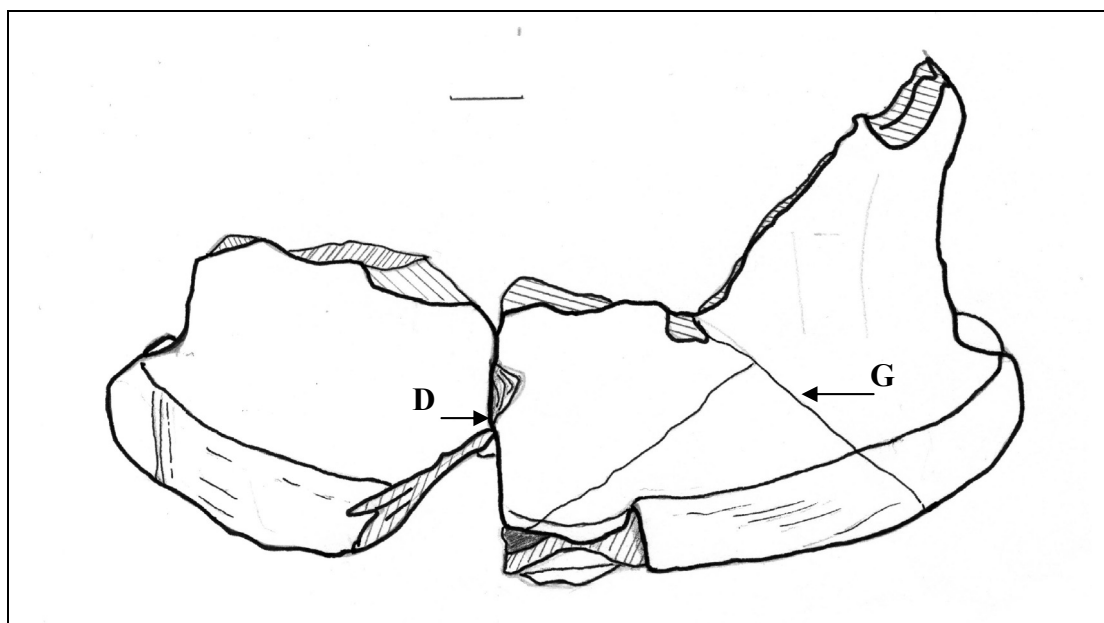


Figure 78: Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vue supérieure ; Echelle : 10 mm.

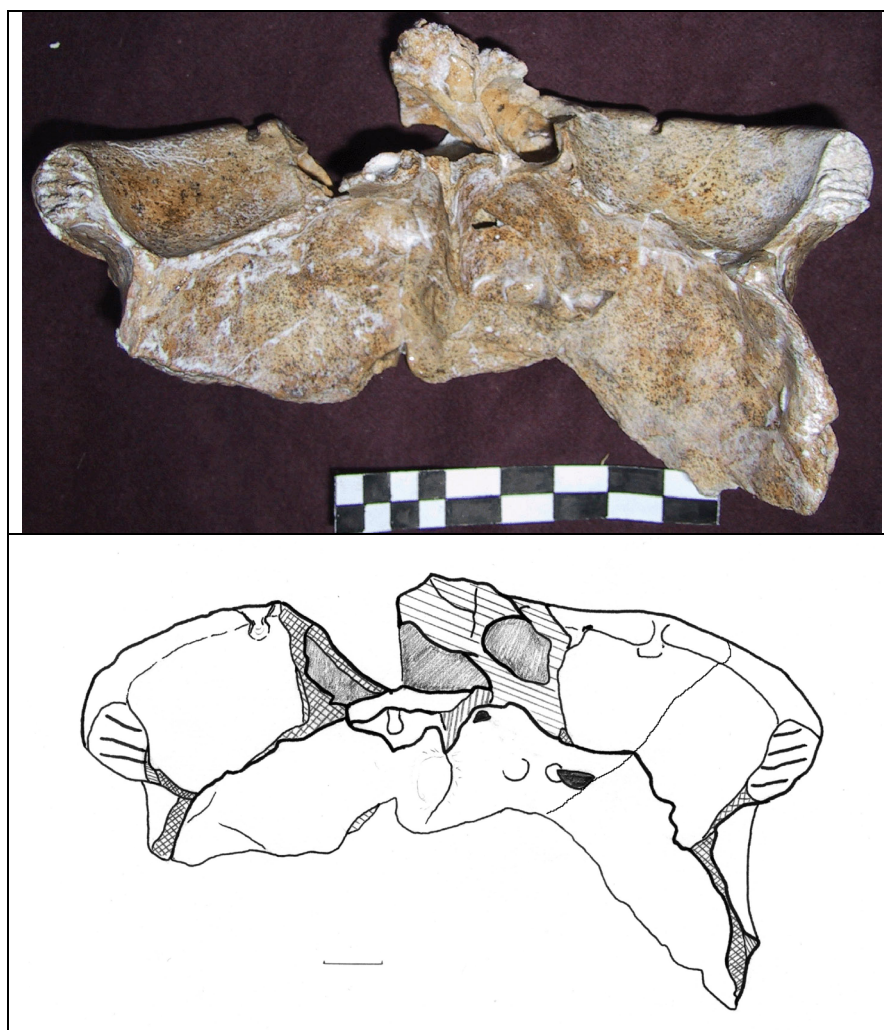


Figure 79 : Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vue inférieure ; Echelle : 10 mm.

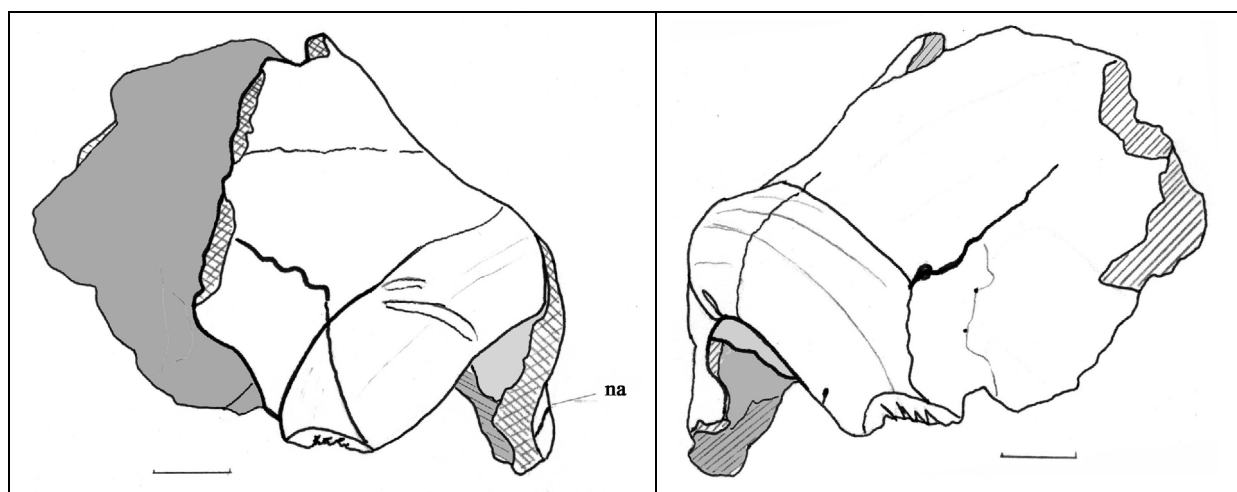


Figure 80: Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vues latérales droite et gauche; Echelle : 10 mm.

La partie supérieure des cavités orbitaires (figure 77) a un contour circulaire, qui diffère ainsi de celui des spécimens d'*Homo heidelbergensis* comme Arago 21.

Les fractures sont multiples et ne présentent pas d'axe privilégié (figures 77, 78, 79, 80). La fracture supérieure qui a rompu l'écaille frontale cérébrale s'étend transversalement depuis le point fronto-temporal droit jusqu'au tiers gauche de l'écaille puis se prolonge obliquement vers la suture coronale. Une fracture profonde (D) s'étend au tiers droit du bord supérieur à la partie postérieure de la fosse supercilière. Une portion surfacique de l'écaille est manquante sur le bord gauche de cette fracture. Celle-ci se scinde alors en deux. Le fragment médian n'a pas été retrouvé. Le bord gauche de cette fracture est franc, rectiligne antéro-postérieurement jusqu'à la suture naso-frontale. Le bord droit de la fracture s'avance obliquement vers la droite, suivant un angle de 45° depuis le point de scindement. Le plan de fracture passe entre l'échancrure frontale interne et l'échancrure sus-orbitaire

Une autre fracture (G) s'étend depuis le bord supérieur, au niveau du tiers gauche, là où la fracture transversale devient oblique postérieurement. Cette fracture est oblique antéro-postérieurement et rejoint l'arcade orbitaire sur son tiers gauche.

Deux autres fractures obliques suivent un axe postérieur droit à antérieur gauche entre les deux fractures principales (D et G) décrites précédemment. La fracture passe de l'arcade orbitaire au niveau de l'apophyse orbitaire interne vers la glabelle qu'elle coupe longitudinalement.

L'étude de l'arcade orbitaire et de l'apophyse orbitaire externe droite permet de constater une particularité de la surface osseuse, la surface vermiculée (TAPPEN, 1978). L'os présente sur sa portion la plus antérieure un aspect finement rainuré (figure 81). Cette surface se retrouve sur le côté gauche, mais n'y est plus visible que sur l'apophyse orbitaire externe du fait des altérations de l'os. Tappen (1978) a précisé qu'elle caractérisait le torus frontal des Néandertaliens adultes, bien que quelques individus modernes ainsi que certains *Homo erectus* puissent présenter ce type de surface. L'étude des autres fragments de cet individu montre que cette particularité surfacique ne se trouve que sur le torus frontal (TAPPEN, 1978). La surface vermiculée présente une disposition antérieure, supérieure et latérale sur l'arcade, mais s'arrête au niveau de l'orbite proprement dite.

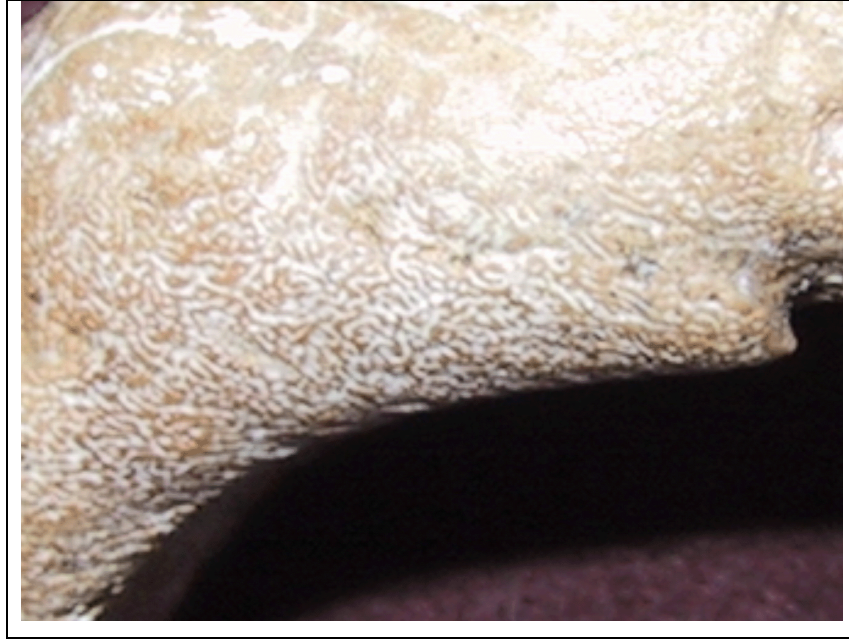


Figure 81 : Zone vermiculée au niveau de l'arcade orbitaire droite de Biache-Saint-Vaast 2.

La crête latérale de l'os frontal est mousse et assez courbée sur le bord gauche. La crête est séparée de l'écaille par une dépression longitudinale dont on ne retrouve pas la base sur le bord droit. Les deux crêtes latérales rejoignent les apophyses orbitaires externes en formant postérieurement une gouttière. Il ne reste des sutures fronto-malaires que le bord frontal. La facette temporale du frontal est assez large et profonde. Le décalage entre la crête latérale gauche et la partie la plus interne de cette facette est de plus de 10 mm. Ce décalage ne peut être évalué sur le côté droit.

Les deux échancrures sus-orbitaires sont ouvertes antérieurement. L'échancrure frontale interne du côté gauche n'existe que sous forme d'un canal. Celle de droite n'a pas été conservée.

Les sinus frontaux (figure 82) sont visibles au niveau des deux arcades et la profondeur peut être jugée au niveau de l'arcade droite où le sinus pénètre longitudinalement au-delà de l'échancrure sus-orbitaire. Le sinus frontal pénètre moins à gauche (il n'atteint pas l'échancrure sus-orbitaire). Verticalement, seule la partie gauche du sinus pénètre dans l'écaille frontale et ceci sur près de 6 mm.

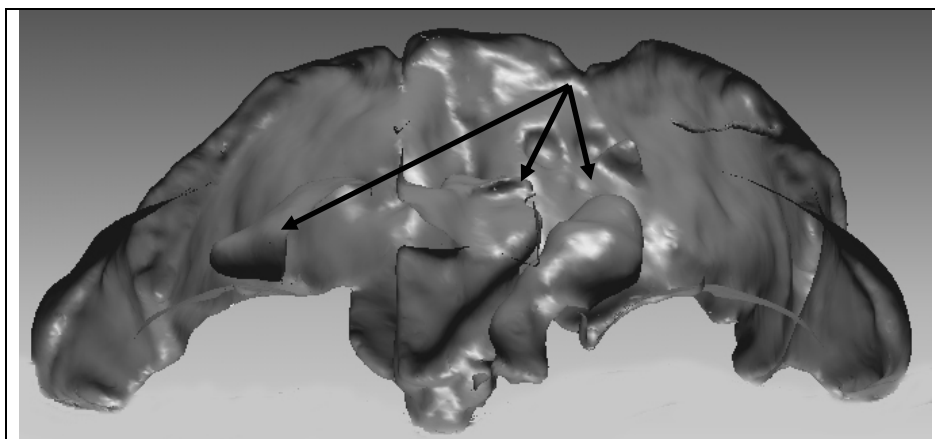


Figure 82: Modélisation virtuelle des cavités sinusales frontales de Biache-Saint-Vaast 2 ;
Vue frontale.

La suture coronale pourrait avoir été conservée sur quelques millimètres, en dessous de la région du stéphanion. Mais seuls des essais de reconstruction permettront de confirmer ou d'infirmer cela.

La portion de l'écaille frontale cérébrale est assez bombée. Son épaisseur va en diminuant depuis sa base jusqu'au point le plus postéro-supérieur préservé. L'épaisseur de l'écaille fracturée oscille entre 6 et 7 mm. En vue supérieure, l'écaille se distingue du torus par une constriction post-orbitaire très marquée (largeur minimale : 102 mm ; largeur maximale du torus : 128 mm).

V.1.1.2 La face endocrânienne de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2

La crête frontale interne mesure plus de 40 mm de long. La base inférieure et le trou borgne n'ont pas été préservés. La crête est effilée au niveau de sa partie inférieure et va en s'épaississant et en s'élargissant dans sa partie supérieure. Sa profondeur maximale est de 10 mm. Rectiligne dans sa partie inférieure, elle dévie vers la droite dans la portion supérieure de l'écaille cérébrale. La base de la gouttière du sinus longitudinal n'a pas été conservée tout comme le sommet des cavités orbitaires (bosses orbitaires). Les empreintes des circonvolutions cérébrales frontales sont visibles, mais peu nombreuses.

V.1.1.3 Proposition de nouvelle articulation des fragments de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2

Nous avons constaté en examinant les pièces originales de Biache-Saint-Vaast 2 un défaut d'articulation des fragments de l'os frontal, défaut lié à la fracture D et à l'angulation

appliquée entre les fragments. Le positionnement du bord droit dans le plan frontal est trop incliné vers le bas au niveau de l'apophyse orbitaire externe et de la suture fronto-malaire.

Nous avons modélisé (figure 83) l'axe point fronto-malaire orbitaire interne – échancrure sus-orbitaire pour les deux arcades sus-orbitaires. Nous constatons le net décalage du point de croisement de ces axes par rapport au plan sagittal médian, décalage lié à la trop forte inclinaison de l'arcade droite.

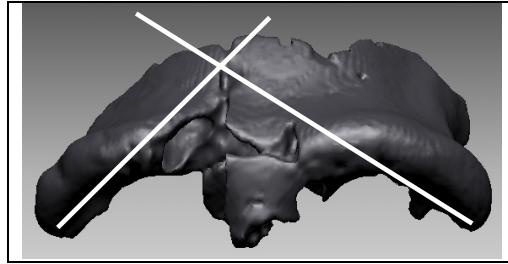


Figure 83 : Mise en évidence de la mauvaise articulation des fragments frontaux de BSV 2 ; Traits : axes point fronto-malaire orbitaire interne – échancrure sus-orbitaire.

Afin de réaligner le bord droit, nous avons symétrisé l'hémi-frontal gauche suivant le plan sagittal (défini par le nasion, la glabelle, et le point supraglabellaire) afin d'avoir une position de référence pour replacer le fragment droit.

Nous avons ensuite séparé virtuellement les deux blocs frontaux en suivant le plan de fracture D. Le bord externe du fragment frontal droit est relevé jusqu'à obtenir le croisement des axes point fronto-malaire orbitaire interne – échancrure sus-orbitaire au niveau du plan sagittal médian (figure 84). Nous avons utilisé le plan de fracture comme axe d'inclinaison et d'articulation du fragment droit par rapport au bord gauche. Le bord externe de la portion droite est positionné plus haut dans l'espace (figures 84 et 85). Ce mouvement modifie les largeurs de l'os frontal (tableau 16).

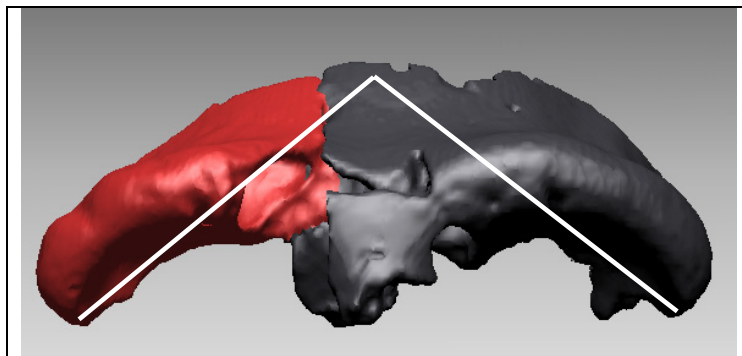


Figure 84 : Nouveau frontal de BSV 2 après reconstitution ; traits : axes point fronto-malaire orbitaire interne – échancrure sus-orbitaire.

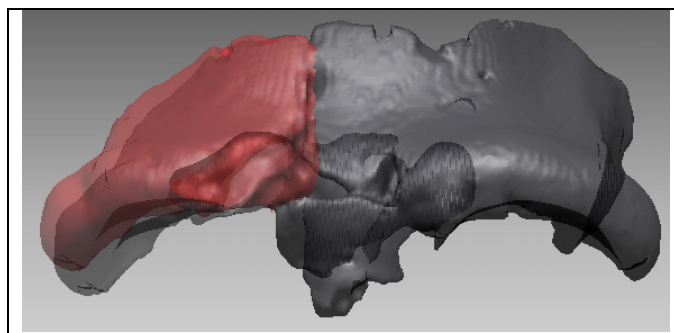


Figure 85 : Superposition en transparence de l'os frontal original et de la portion droite remaniée.

Tableau 16 : Nouvelles mesures relevées sur l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2.

Largeurs	Original	Reconstruction Virtuelle
Fronto-malaire orbitaire interne	111 mm	115,4 mm
Maximale du torus sus-orbitaire	126,4 mm	128,7 mm
Minimale frontale	102,6 mm	104,4 mm
Entre les extrémités postérieures	104,1 mm	108,4 mm
Entre les extrémités inféro-postérieures	91,3 mm	97,5 mm

Notre proposition de reconstruction de l'os frontal présente une plus grande ouverture postérieure (entre 4 et 6 mm de plus).

V.1.2 L'os pariétal

V.1.2.1 La face exocrânienne

Seule la face latérale de l'écaille pariétale a pu être reconstituée à partir des 6 principaux fragments retrouvés (figure 86). La plus grande portion intacte, plus ou moins rectangulaire, correspond au bord postéro-inférieur de l'os pariétal et permet d'étudier l'astérion. Nous constatons la présence d'une structure assimilable à un torus angularis (figure 86) dans cette région. Ce torus est assez large en son extrémité postérieure, mais relativement aplati en son milieu. Cette structure est moins robuste que celle d'Arago 47, mais plus saillante que celle de Biache-Saint-Vaast 1. Nous n'avons pas trouvé de structures similaires chez les Hominidés fossiles que nous avons pu consulter (collection du laboratoire d'Anthropologie, Faculté de Médecine Nord, Marseille, 2003). Les involutions du bord lambdatique ont été conservées, tout comme la suture pétreuse. Les lignes temporales supérieure et inférieure (fracturées antérieurement) encadrent dans la région postéro-inférieure

un épaississement assimilable à un torus angularis. Toute la portion d'écaille au-dessus des lignes temporales est absente, ainsi que la portion coronale de l'os. La ligne inférieure pourrait réapparaître sur l'un des fragments antérieurs, à proximité de la zone coronale mais l'état du fossile ne permet pas de trancher.

Deux portions de la table externe de l'os ont disparu au niveau de la fracture antérieure de ce principal fragment. A l'exception de ces pertes osseuses et de quelques lacunes au niveau des croisements entre les fragments, les fractures entre les six fragments pariétaux sont franches avec peu de bordures émoussées.

L'épaisseur minimale (5 mm) de l'os pariétal se trouve au niveau antérieur, à proximité de la zone coronale. La plus grande épaisseur se situe au niveau du torus angularis (12 mm). On retrouve une épaisseur identique au niveau de l'angle postéro-supérieur. L'épaisseur diminue graduellement vers l'avant. Au niveau de la suture pétreuse, l'os mesure 7 mm d'épaisseur.

V.1.2.2 La face endocrânienne

Le réseau vasculaire méningé moyen a été relativement bien préservé au niveau de la zone postérieure (figure 87). Antérieurement, les empreintes des vaisseaux ont constitué des points de moindre résistance pour l'os. Certaines fractures suivent le grand axe de ces empreintes.

Le rameau postérieur est bien conservé. Plusieurs collatérales se sont individualisées. Les empreintes des circonvolutions sont nettes dans la portion antérieure du pariétal.

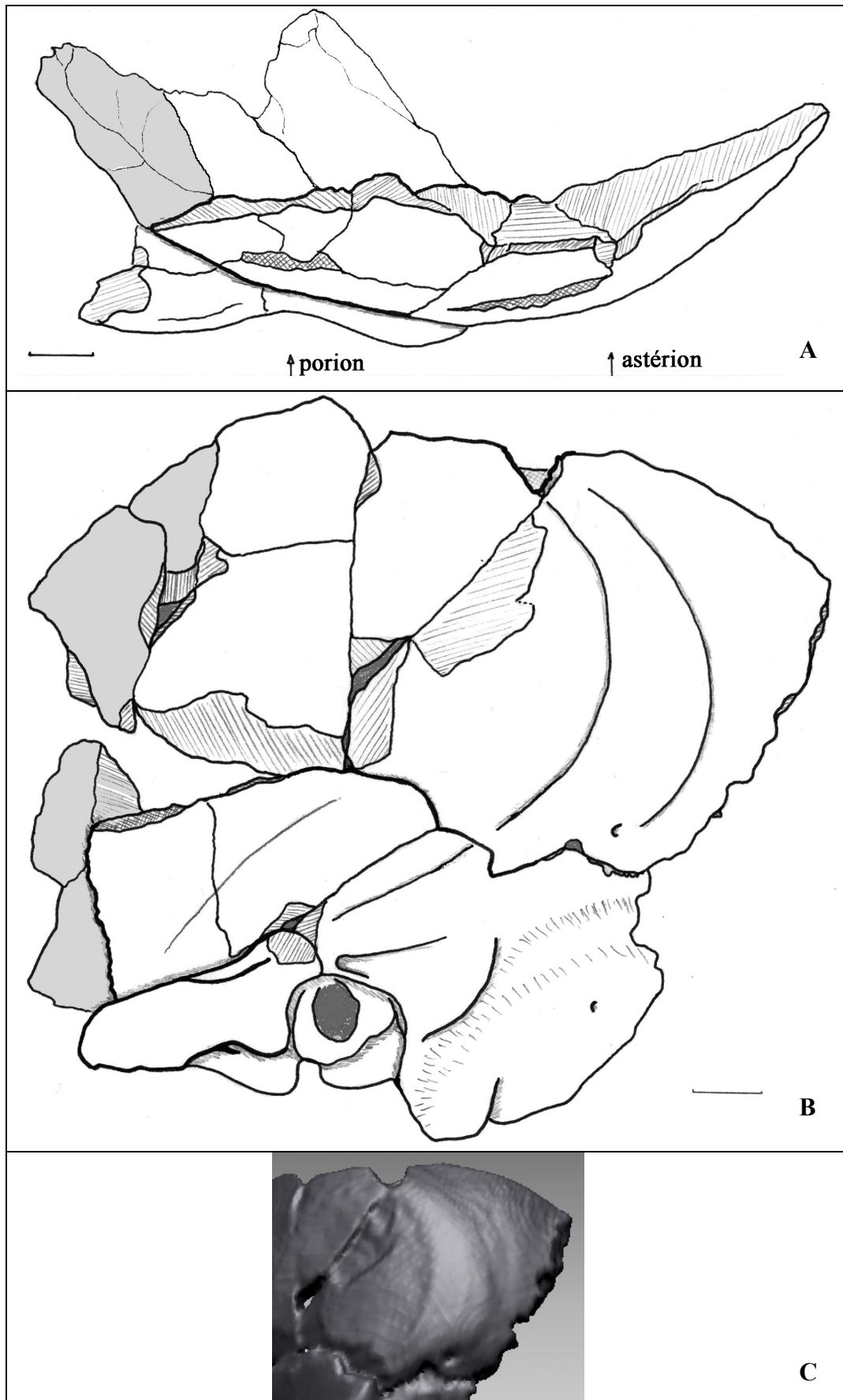


Figure 86 : Bloc pariéto-temporosphénoïde gauche de BSV 2, vue supérieure (A), latérale (B) et torus angularis (C) ; En gris : fragments en position incertaine ; Echelle : 10 mm.

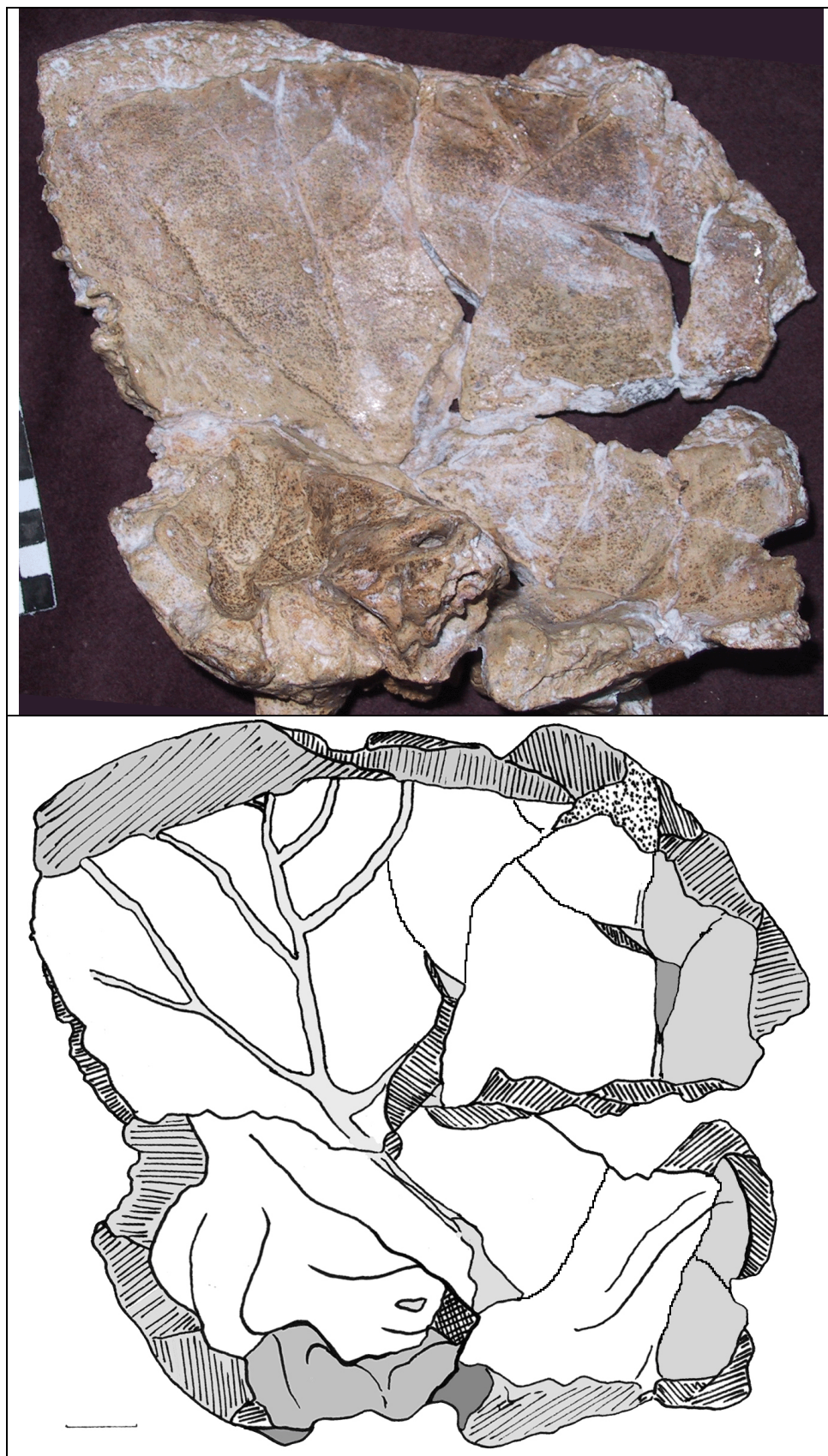


Figure 87 : BSV 2 ; Bloc pariéto-temporal-sphénoïde, vue endocrânienne ; En gris sur le bord antérieur : fragments en position incertaine ; Echelle : 10 mm.

V.1.2.3 Présence d'un chignon occipital sur Biache-Saint-Vaast 2

La non conservation de la portion sagittale de l'écaille pariétale et l'absence de l'os occipital empêchent d'affirmer la présence d'un chignon occipital.

Nous émettons l'hypothèse que Biache-Saint-Vaast 2 possédait un chignon occipital avec une dépression pré-lambdatique pour deux raisons :

1/ Le spécimen Biache-Saint-Vaast 1 est contemporain de Biache-Saint-Vaast 2 (TUFFREAU, 1988) et présente un chignon occipital (ROUGIER, 2003) ;

2/ Le bord postéro-supérieur du fragment pariétal de BSV 2 présente un changement de courbure au niveau de la suture lambdatique gauche (figure 88).

Nous ne pouvons affirmer que BSV 2 ait possédé un chignon occipital, mais il est aussi impossible d'affirmer qu'il n'y en ait pas eu. L'attribution de ce caractère à BSV 2 est liée à son appartenance phylétique. Alors que sa présence correspondrait à une apomorphie néandertalienne (HEIM, 1986) son absence correspondrait à un *Homo heidelbergensis*, chez qui ce caractère n'est pas tout le temps présent (absence chez Sima de los Huesos 5, mais présence chez Petralona).

Nous validerons ou invaliderons cette hypothèse lors de la reconstruction du crâne du spécimen, après avoir comparé ces fragments à des spécimens des deux espèces.

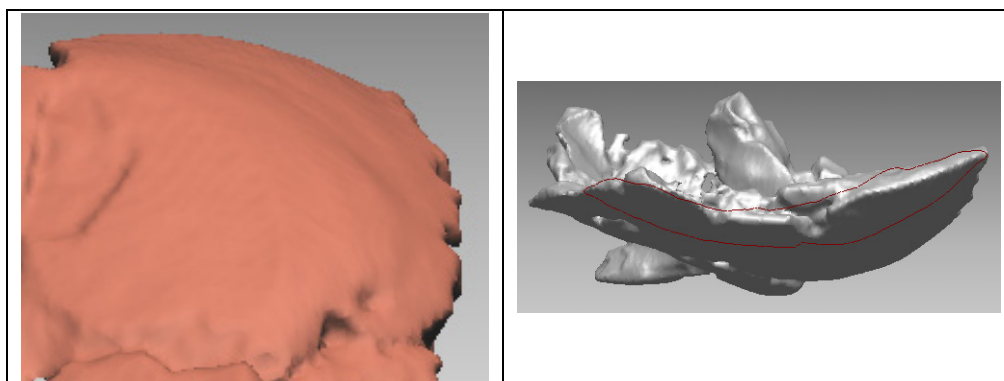


Figure 88: Début de la dépression pré-lambdatique de Biache-Saint-Vaast 2.

V.1.2.4 Suggestion de modification de l'assemblage de l'os pariétal gauche de Biache-Saint-Vaast 2

Tout comme pour l'os frontal, nous estimons que l'assemblage des fragments de l'os pariétal a généré une mauvaise articulation des deux fragments antérieurs de la portion reconstituée. Ceci est observable avec un changement marqué de la courbure longitudinale au niveau antérieur de la reconstruction. Les deux fragments concernés présentent une

orientation antérieure trop externe (figure 89). Nous remédierons à cette déformation lors de la reconstitution virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2.

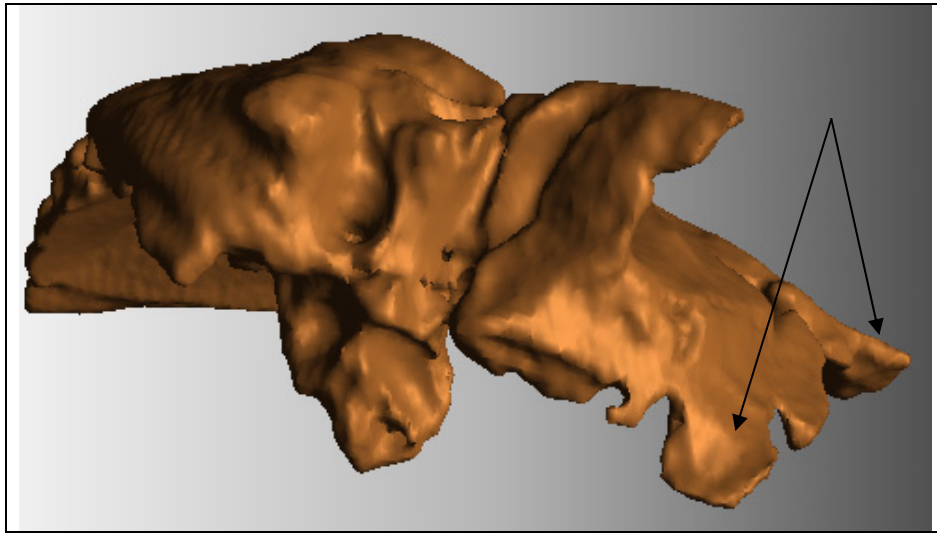


Figure 89 : Bloc pariéto-temporal-sphénoïde de Biache-Saint-Vaast 2, vue inférieure. Fragments mal articulés.

V.1.3 L'os temporal de Biache-Saint-Vaast 2

Cet os a également été reconstitué à partir de 6 fragments retrouvés. Il manque l'extrémité antérieure de l'apophyse zygomatique ainsi que le pourtour supérieur de l'écaille, l'apophyse styloïde, la partie distale du rocher et la partie interne de l'apophyse vaginale. En vue endocrânienne, le rocher est fracturé distalement après l'ouverture du conduit auditif interne. L'ouverture du canal carotidien est absente.

La ligne temporale inférieure du pariétal se prolonge par la *linea temporalis* qui possède un aspect de bourrelet jusqu'à la base de l'apophyse zygomatique. Ce bourrelet se divise un peu avant pour donner l'épine de Henle. En arrière de cette structure apparaît l'apophyse mastoïde, très petite. En vue postérieure, l'apophyse mastoïde est orientée vers l'intérieur du crâne. Ceci contribue à donner un contour assez courbé dans le plan frontal, évoquant les crânes néandertaliens. Le trou mastoïdien est présent.

Il ne subsiste de l'apophyse zygomatique que la tubérosité zygomatique antérieure. Le condyle est intact tout comme le conduit auditif externe qui se trouve dans l'axe de l'apophyse zygomatique comme chez les Néandertaliens Monte Circeo 1, La Chapelle-aux-Saints, Spy 2, La Ferrassie 1 (PATTE, 1955). La cavité glénoïde apparaît très étroite. La gouttière de l'artère occipitale est fracturée postérieurement au niveau de l'éminence juxta-mastoïdienne. La rainure digastrique est complète.

Le réseau méningé est difficile à observer, de nombreuses fractures correspondantes à des sillons ayant contribuées à la perte de fragments.

V.1.4 L'os sphénoïde gauche de Biache-Saint-Vaast 2

Il ne subsiste de cet os que deux fragments de la face temporale de la grande aile gauche. Les deux fragments ont été mal articulés (figure 89), avec un axe antéro-postérieur trop oblique vers l'intérieur. Tout comme pour les fragments pariétaux problématiques nous avons essayé de compenser cette déformation lors de la reconstitution du crâne de Biache-Saint-Vaast 2.

V.1.5 L'os occipital de Biache-Saint-Vaast 2

Il se résume aux deux condyles prolongeant postérieurement l'apophyse basilaire (figure 90). Deux fractures transversales séparent l'apophyse basilaire des deux condyles (une fracture de chaque côté).

Le condyle droit est incomplet alors que le gauche est entier. La fossette condylienne antérieure a été préservée des deux côtés. La partie antérieure de la surface basilaire gauche est altérée. Entre les deux surfaces basilaires, le tubercule pharyngien est peu marqué, au contraire de la fossette pharyngienne. La ligne de suture sphénoïdo-occipitale est altérée.

Il ne subsiste de la gouttière basilaire que la partie postérieure. Latéralement, la gouttière du sinus pétreux inférieur est mieux préservée à droite qu'à gauche. Les tubercules jugulaires surmontent les trous condyliens antérieurs gauche et droit, bien préservés. Nous notons une forme tubulaire du canal droit tandis que celui de gauche présente un aspect ovalaire, pincé en son milieu. L'échancrure jugulaire gauche est bien préservée.

Postérieurement, le fragment se termine après la gouttière des nerfs mixtes. Latéralement, l'os s'arrête à la base de l'échancrure jugale.

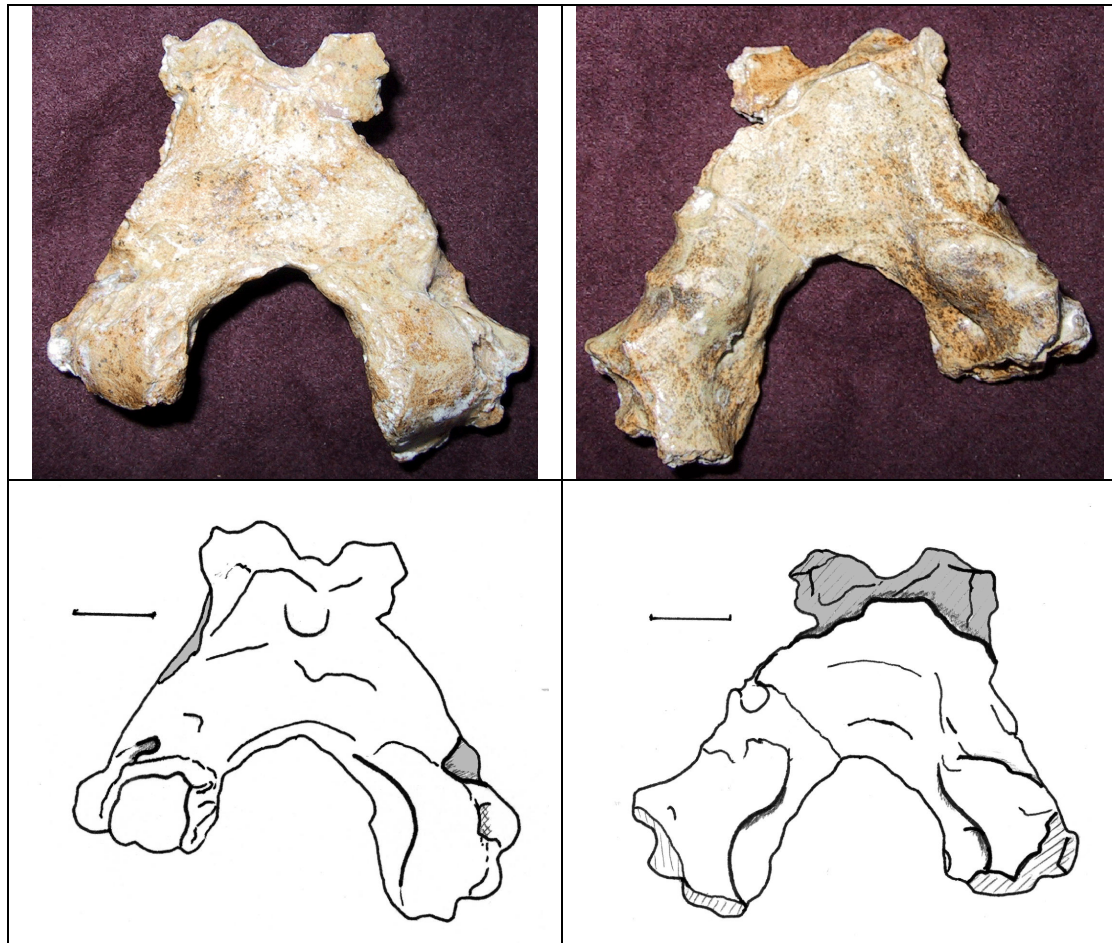


Figure 90 : Os occipital de Biache-Saint-Vaast 2 ; Vue inférieure et supérieure ; Echelle : 10 mm.

Nous présentons dans le tableau 17 des mesures prises directement sur les fragments de Biache-Saint-Vaast 2.

Tableau 17: Quelques mesures prises sur les fragments de Biache-Saint-Vaast 2 en mm.

Epaisseur des arcades	gauche	interne	16,2
		médiane	14,2
		externe	13,7
	droite	interne	-
		médiane	15
		externe	14,4
M9 Largeur frontale minimale		102,6	
M43' Largeur maximale du torus		127,8	
Corde Porion Astérion		46	

V.2 Age et sexe de l'individu Biache-Saint-Vaast 2

Biache-Saint-Vaast 2 présente une morphologie assez robuste, avec un torus frontal prononcé, un pariétal assez épais (11 mm au niveau du plan de fracture). Ce pariétal présente un torus angularis plus marqué que sur Biache-Saint-Vaast 1, tout comme les lignes temporales supérieure et inférieure. La mastoïde apparaît plus distinctement. Nous considérons, tout comme M.-A. de Lumley (communication personnelle) qu'il s'agit d'un individu de sexe masculin.

L'estimation de l'âge se révèle plus difficile. Nous ne possédons pas de dents. Les principales sutures crâniennes sur lesquelles nous pourrions extrapoler un âge, n'ont pas été conservées. Il ne subsiste qu'une portion de la suture naso-frontale, inexploitable. Selon Trinkaus (1973) la présence des sinus frontaux n'est pas un indicateur de stade adulte. Nous émettons l'hypothèse que l'individu était au minimum un adolescent proche du stade adulte vu la robustesse générale des fragments.

V.3 Position chronostratigraphique de Biache-Saint-Vaast 2

Tous les restes humains proviennent de la couche IIa qui, par la méthode de thermoluminescence des silex brûlés, a été datée d'un âge moyen de $175\,000 \pm 13\,000$ ans B.P (SOMME *et al.*, 1988). En raison de l'écart temporel entre le prélèvement et la datation de ces silex, la période a été réévaluée, avec un niveau de confiance de 95%, dans un intervalle compris entre 149 000 et 201 000 ans B.P.

Les données issues de la stratigraphie océanique correspondant à cette période la limite entre les stades isotopiques 7 et 6. La faune et la flore continentales, de type « nettement tempéré », laissent supposer que ce niveau et ces individus correspondent au début du stade 7 (7a) avec un âge plus proche de 200 000 que de 150 000 ans B.P (SOMME *et al.*, 1988).

V.4 Proposition de reconstitution virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2

La fragmentation de l'individu et l'absence d'articulation évidente entre les pièces osseuses nous ont amené à chercher au sein des spécimens fossiles à notre disposition celui possédant le plus grand nombre de caractères anatomiques et morphologiques communs. Nous utiliserons ensuite ce spécimen comme support pour orienter les fragments dans l'espace.

V.4.1 Choix du spécimen de référence

Nous avons commencé la sélection d'un spécimen de référence avec l'os frontal. Pour des raisons chronologiques, phylétiques et géographiques, nous avons limité la recherche aux fossiles d'*Homo heidelbergensis* d'Europe et aux Néandertaliens auxquels nous avons accès (collection du Laboratoire d'Anthropologie de la Faculté de Médecine, secteur Nord, Marseille, 2003). Le choix a été restreint aux individus les mieux conservés (tableau 18).

Tableau 18 : Liste des fossiles comparés avec Biache-Saint-Vaast 2.

<i>Homo heidelbergensis</i> :	Arago 21 (Arago3D) ; Petralona ; Sima de los Huesos 5.
<i>Homo neanderthalensis</i> :	Krapina 3 ; Amud 1 ; Circeo 1 ; La Ferrassie 1 ; Neandertal ; La Chapelle-aux-Saints ; La Quina H5.
	Biache-Saint-Vaast 1.

Nous avons comparé les contours de l'écaille frontale de Biache-Saint-Vaast 2 avec ceux des autres spécimens. Deux types de comparaisons ont été réalisés :

- 1/ Comparaison des profils sagittaux médians ;
- 2/ Comparaison des contours transversaux des fragments de l'os frontal.

Les comparaisons ont été réalisées (sans modification de taille des crânes) à partir de profils relevés sur des modélisations surfaciques tridimensionnelles.

V.4.1.1 Comparaison des profils sagittaux frontaux

La comparaison de contours crâniens nécessite un alignement tridimensionnel des individus concernés. Aligner des fragments s'avère difficile. Il est impossible d'aligner les fragments frontaux suivant le plan de Francfort. Nous avons pris comme point de référence le

nasion et nous avons fait correspondre les courbures des zones glabellaire et supraglabellaire ainsi que les sutures fronto-malaires (figure 91). Nous considérons la zone glabellaire (seule zone visible dans ce plan) comme une portion du bourrelet sus-orbitaire.

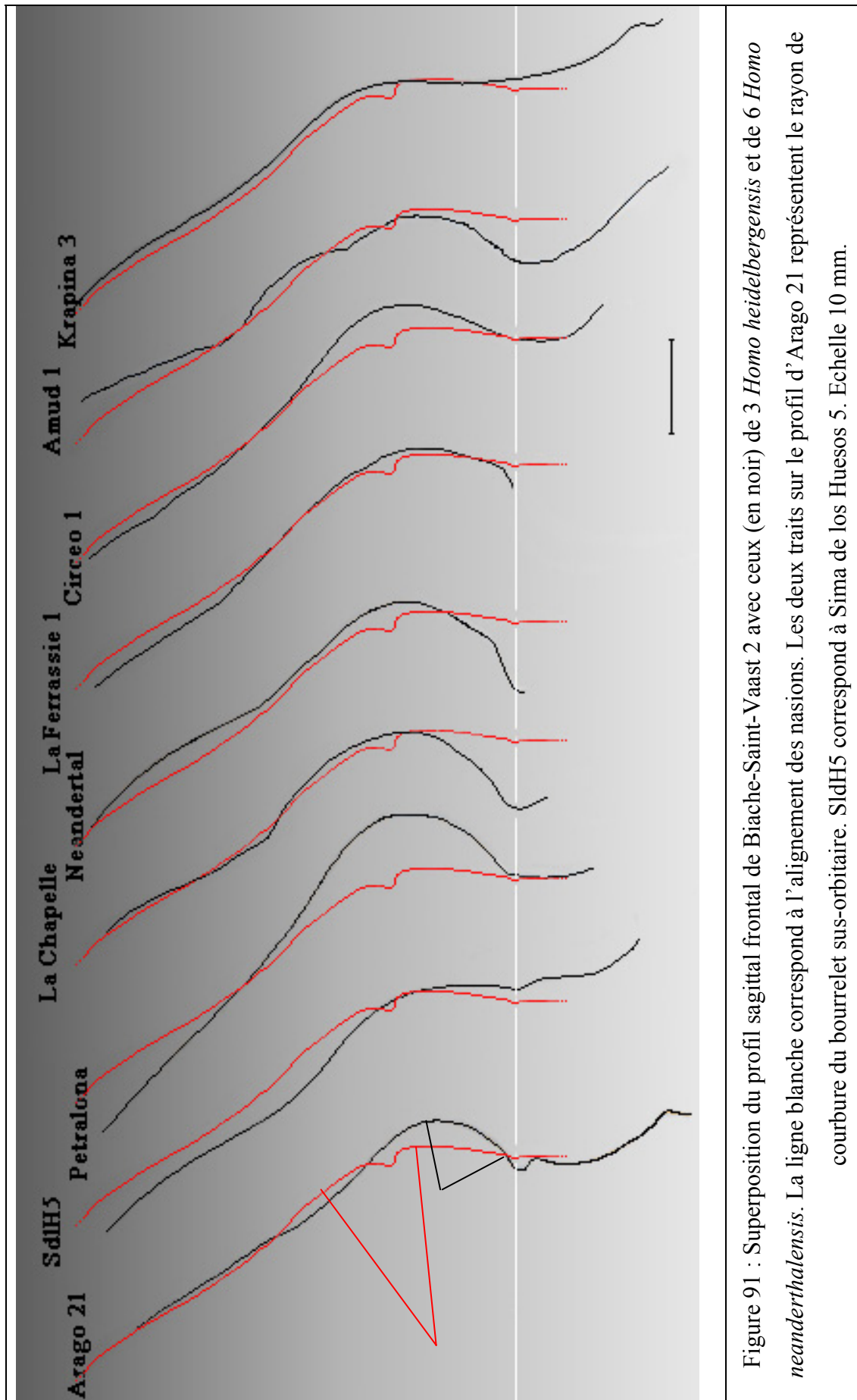
Les trois *Homo heidelbergensis* présentent des profils crâniens différents de celui de Biache-Saint-Vaast 2, ainsi que des différences entre eux. L'écaille frontale cérébrale de la nouvelle reconstruction d'Arago 21 présente un tracé similaire jusqu'au niveau de la fosse supraglabellaire. Celle-ci est beaucoup plus allongée chez Arago 21 alors qu'elle est presque inexistante chez Biache-Saint-Vaast 2. Le bourrelet sus-orbitaire frontal d'Arago 21 présente un rayon de courbure plus faible et une glabelle plus avancée que celle de BSV 2. La courbure sagittale des os propres du nez s'inverse par rapport au bourrelet sus-orbitaire à partir du nasion alors que dans cette comparaison la glabelle de BSV 2 se superpose presque au nasion en projection horizontale.

L'individu Sima de los Huesos 5 présente une glabelle pratiquement confondue avec le nasion en projection horizontale. Le rayon de courbure du bourrelet sus-orbitaire est inférieur. Le tracé de l'écaille frontale cérébrale ne peut être superposé à celui de BSV 2 en raison d'une avancée moindre de celle-ci. Ceci est la conséquence d'une dépression supraglabellaire plus marquée, même si elle l'est moins que celle d'Arago 21.

Des trois *Homo heidelbergensis*, Petralona présente le profil sagittal le plus différent. Le bourrelet sus-orbitaire de ce fossile a un rayon de courbure supérieur à celui d'Arago 21 mais largement inférieur à celui de BSV 2. Ce bourrelet s'avance plus antérieurement que celui d'Arago 21. La courbure se prolonge postérieurement par un tracé fuyant de l'écaille frontale cérébrale.

La comparaison du profil frontal sagittal de Biache-Saint-Vaast 2 avec celui des Néandertaliens considérés met en évidence de plus grandes similitudes.

Les os frontaux de Neandertal 1, de La-Chapelle-aux-Saints et de La Ferrassie 1 présentent un tracé sagittal similaire (à l'exception d'un léger renflement de la base de l'écaille frontale cérébrale de Neandertal jusqu'au point supérieur de la zone comparée). Le tracé de l'écaille frontale cérébrale de ces spécimens (sauf Neandertal) est similaire à celui de BSV 2 jusqu'au niveau de la glabelle. Les différences avec cet individu correspondent à un rayon de courbure moindre pour le bourrelet sus-orbitaire. Les divergences apparaissent à partir de la glabelle, les tracés continuant vers le bas et l'arrière en se courbant alors que celui de BSV 2 est vertical. Le nasion de ces trois spécimens est plus postérieur que celui de BSV 2 (nous supposons la position du nasion de La Ferrassie 1 après examen des portions fronto-maxillaires latérales conservées).



La superposition du profil sagittal de Monte Circeo 1 et de BSV 2 présente seulement deux zones communes (nasion et point supraglabellaire). Le bourrelet sus-orbitaire de Monte Circeo 1 a un rayon de courbure moindre à celui de BSV 2. La glabelle de Circeo 1 est plus antérieure que celle de BSV 2. Le tracé de l'écaille frontale cérébrale est identique depuis le point supraglabellaire jusqu'au sommet de l'écaille conservée. Le métopion théorique de BSV 2 est avancé par rapport à celui de Monte Circeo 1.

Amud 1 a une écaille frontale cérébrale morcelée et reconstituée. La superposition des deux profils sagittaux est difficile. Le nasion de BSV 2 est antérieur et les bourrelets sus-orbitaires présentent des rayons de courbure différents, supérieurs pour BSV 2. L'écaille frontale cérébrale d'Amud 1 est plus antérieure (avec un métopion plus antérieur). Petralona et Amud 1 ont les profils sagittaux les plus différents de celui de Biache-Saint-Vaast 2.

Krapina 3 a le profil sagittal frontal le plus comparable morphologiquement à celui de BSV 2 à l'exception d'une légère avancée de la zone glabellaire chez BSV 2. Les deux écailles frontales cérébrales ont les mêmes tracés jusqu'aux bourrelets sus-orbitaires qui ont des rayons de courbures presque identiques (BSV 2 supérieur). Les tracés sagittaux depuis la glabelle jusqu'au nasion sont eux aussi identiques.

De tous les profils frontaux sagittaux comparés, Krapina 3 présente celui le plus comparable à BSV 2.

V.4.1.2 Comparaison des profils frontaux transversaux

En raison du niveau de fracturation du fossile Biache-Saint-Vaast 2, le plan de coupe (figure 92) a été choisi virtuellement pour obtenir le plus long contour frontal transversal. Ce plan permet d'obtenir le contour du bourrelet sus-orbitaire ainsi que la forme de la fosse temporale du frontal. Il permet d'avoir une représentation de la largeur frontale minimale mais ne permet pas de comparer la zone entre les torus sus-orbitaires gauche et droit.

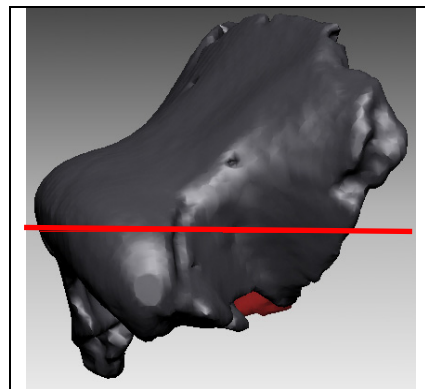


Figure 92 : Plan de coupe transversal utilisé.

Petralona (figure 93) présente la plus grande largeur frontale antérieure ainsi qu'une forte avancée de l'espace inter-orbitaire. La largeur frontale minimale est nettement supérieure. Le rayon de courbure de la fosse temporale frontale est important. A l'opposé, le rayon de courbure de la fosse temporale frontale de BSV 2 est très réduit. La fosse temporale de Biache-Saint-Vaast 2 est très profonde.

Monte Circeo 1, La Ferrassie 1, Amud 1, La Chapelle aux Saints, L'Homme de Neandertal présentent une morphologie semblable au niveau de la coupe transversale. La fosse temporale frontale est peu marquée avec un fort rayon de courbure.

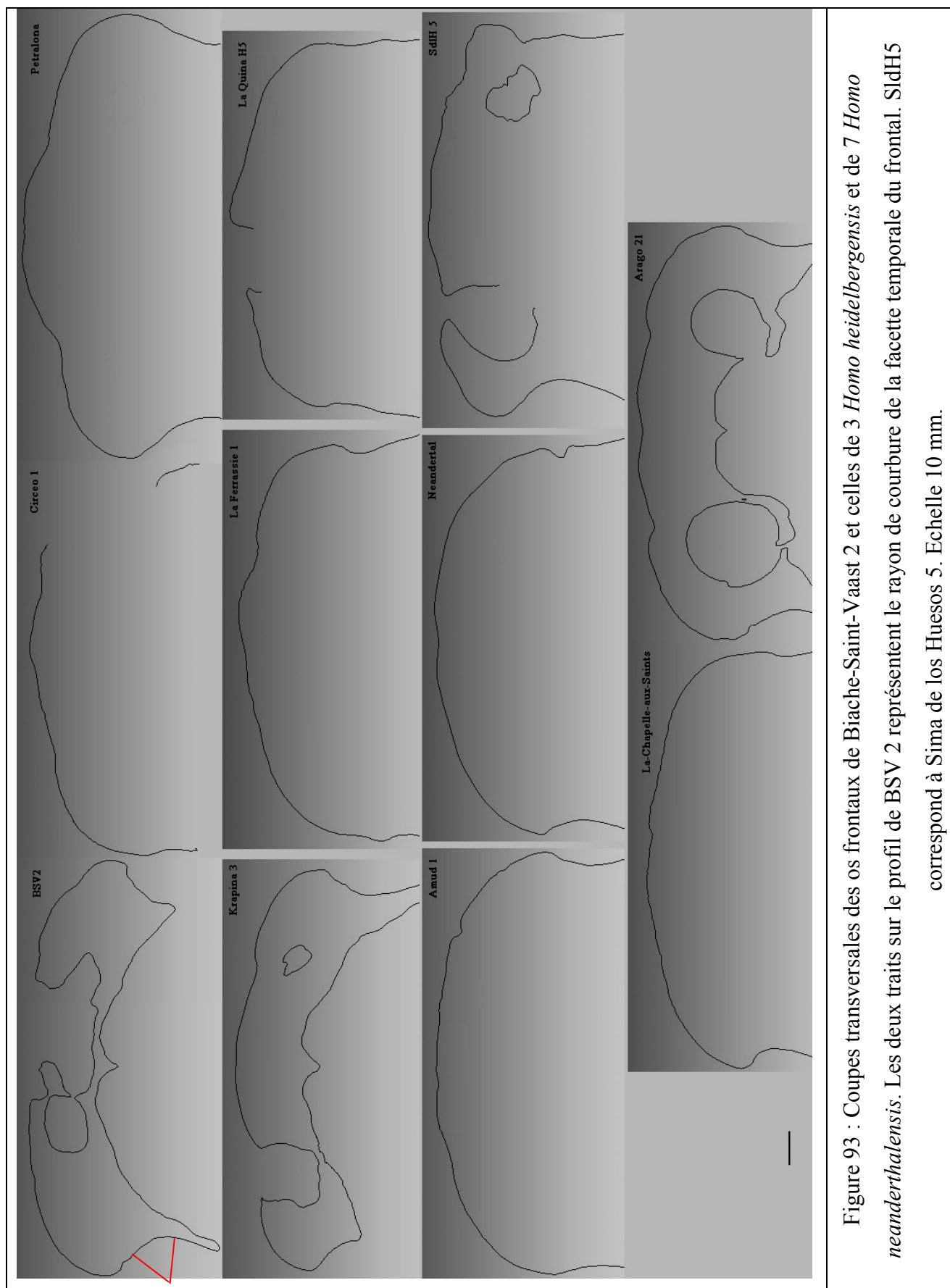
La Quina H5 présente le même aspect que ces Néandertaliens, mais avec une plus grande avancée de la zone inter-orbitaire.

Sima de los Huesos 5 a une morphologie différente : le rayon de courbure et la profondeur de la fosse temporale du frontal sont plus proches de ceux de Biache-Saint-Vaast 2 mais le contour du bourrelet sus-orbitaire diffère avec une distinction au niveau de l'arcade orbitaire et de l'apophyse orbitaire externe. Autre différence, le plan de coupe traverse les cavités orbitaires de Sima de los Huesos 5 ce qui n'est pas le cas de BSV 2.

Notre reconstitution d'Arago 21 se distingue de BSV 2 au niveau des structures anatomiques et par la coupe passant au niveau des cavités orbitaires.

Krapina 3 présente une largeur minimale moindre que celle de Biache-Saint-Vaast 2. La fosse temporale frontale présente un tracé assez similaire à celui de Sima de los Huesos 5. La différence entre Krapina 3 et la Sima de los Huesos 5 et l'analogie avec BSV 2 a lieu au niveau de la transition entre le bourrelet et la fosse temporale. Cette transition est plus mousse chez Sima de los Huesos 5 et plus saillante chez Krapina 3 et BSV 2.

Les différences morphologiques au niveau des coupes transverses sont plus ténues et plus difficiles à relever que sur les coupes sagittales frontales. Mais Krapina 3 présente la morphologie la plus semblable à celle de Biache-Saint-Vaast 2.



V.4.1.3 Comparaison des profils pariéto-temporaux en coupe frontale.

Nous avons choisi comme plan l'axe mastoïde – incisure pariétale en raison du faible nombre de points de repères précis et reproductibles disponibles sur le bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 (figure 94). Les coupes ont ensuite été superposées pour obtenir une correspondance aux niveaux du processus mastoïdien, des sutures pariéto-temporales et de l'axe du rocher (lorsqu'il était disponible).

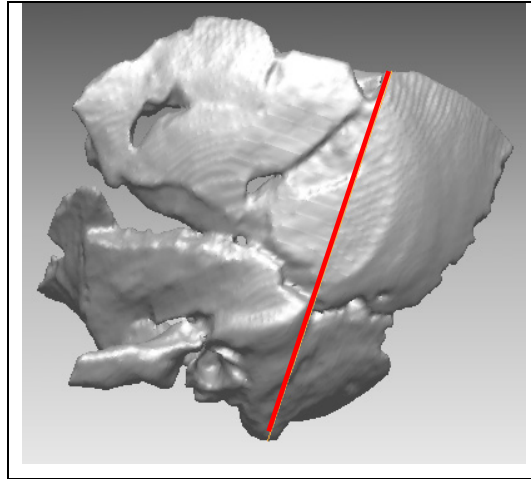
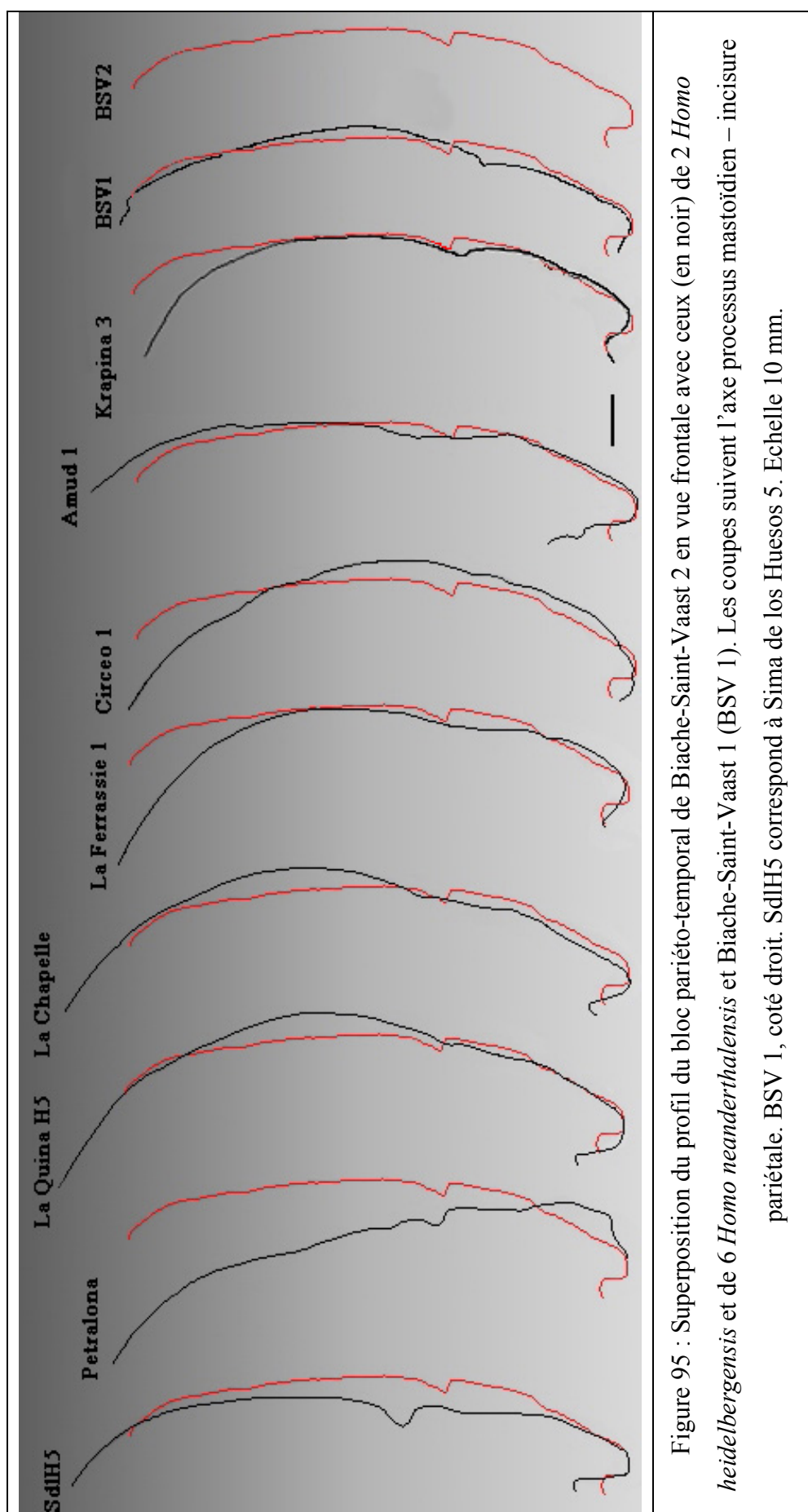


Figure 94 : Plan de coupe du bloc pariéto-temporal de BSV 2 de la mastoïde à l'incisure pariétale.

Suivant cet axe choisi, Biache-Saint-Vaast 2 (figure 95) présente une écaille pariétale latérale presque verticale, ne changeant de courbure qu'au niveau de la ligne temporale inférieure. Biache-Saint-Vaast 2 présente un petit processus mastoïdien étroit et peu développé.

La superposition directe (suivant la courbure générale de l'écaille) du bloc pariéto-temporal de BSV 2 sur Petralona montre une similarité du contour exocrânien. Mais un tel placement du bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 entraîne une orientation beaucoup trop basse du rocher.

La comparaison de BSV 2 avec La Quina H5, La Chapelle-aux-Saints, La Ferrassie 1 et Monte Circeo 1 permet de constater une différence de courbure de l'écaille latérale du pariétal. Celle-ci est beaucoup plus bombée chez ces Néandertaliens qu'elle ne l'est chez Biache-Saint-Vaast 2. De plus, ces Néandertaliens ont dans leur ensemble un processus mastoïdien plus curviligne et plus large que celui de BSV 2, et un profil temporal similaire (surtout La Quina H5).



Sima de los Huesos 5 a une courbure générale du bloc pariéto-temporal moindre que celle de BSV 2. Sima de los Huesos 5 a des bords latéraux verticaux. La hauteur de l'os temporal de Sima de los Huesos 5 est supérieure au niveau de cette coupe à celle de Biache-Saint-Vaast 2 et des autres spécimens déjà évoqués. Ceci pourrait résulter du fort développement et de l'allongement vertical du processus mastoïdien.

Amud 1 présente presque la même courbure que BSV 2 à l'exception d'une dépression au niveau de la suture pariéto-temporale. Au niveau supérieur, le changement de courbure de l'écaille pariétale de BSV 2 est plus bas que celui d'Amud 1. Amud 1 présente le même profil pour l'os temporal à l'exception du processus mastoïdien, plus long et plus haut que celui de BSV 2.

Krapina 3 a un os temporal plus court, mais avec le même type de processus mastoïdien. Le tracé de la portion latérale de l'écaille pariétale est identique à celui de Biache-Saint-Vaast 2 jusqu'au niveau de la ligne temporale inférieure de Krapina 3. Puis la courbure du pariétal s'infléchit plus que celle de BSV2 qui s'infléchit deux centimètres au-dessus. Ceci pourrait être lié à une différence de taille et de sexe entre BSV 2 et Krapina 3.

Nous avons comparé Biache-Saint-Vaast 1 et 2. Nous avons comparé le bord droit de BSV 1 que nous avons symétrisé. L'os temporal de BSV 1 est moins haut que celui de BSV 2 et présente un processus mastoïdien moins détaché. La courbure de l'os pariétal droit de BSV 1 est un peu plus marquée que celle de BSV 2.

V.4.1.4 Comparaison des profils pariéto-temporaux en vue transversale

Le choix du plan de coupe dépend de l'état fragmentaire du bloc pariéto-temporal de BSV 2 et la recherche des points de repères précis. Nous avons choisi une coupe partant de l'astérion postérieurement jusqu'au niveau du kryptaphion antérieurement (figure 96). Nous avons défini le kryptaphion de BSV 2 à partir du fossile original et en étudiant les autres spécimens fossiles disponibles.

Le plan de coupe traverse quelques fractures de Biache-Saint-Vaast 2 et génère ainsi trois courtes portions, la plus antérieure étant réduite à quelques millimètres (figure 97). La zone la plus bombée correspond à la fin des lignes temporales supérieure et inférieure et à un torus angularis large et peu développé.

BSV 1 n'est présenté qu'à titre indicatif en raison de la non conservation des bords antérieurs des pariétaux droit et gauche. Nous pouvons seulement constater que le contour général de BSV 1 est moins courbé que celui de BSV 2.

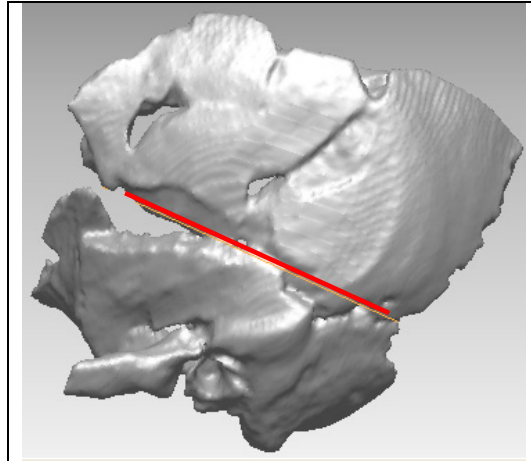


Figure 96 : Plan de coupe transversal du bloc pariéto-temporal de BSV 2. Axe astérion - kryptaphion.

Petralona présente un tracé antérieur correspondant à celui de BSV 2 mais le tracé se différencie postérieurement avec l'absence de courbure de l'écaille pariétale au niveau de l'astérion. Cette zone est précédée antérieurement d'une légère dépression chez Petralona, accentuant l'absence de courbure au niveau de l'astérion.

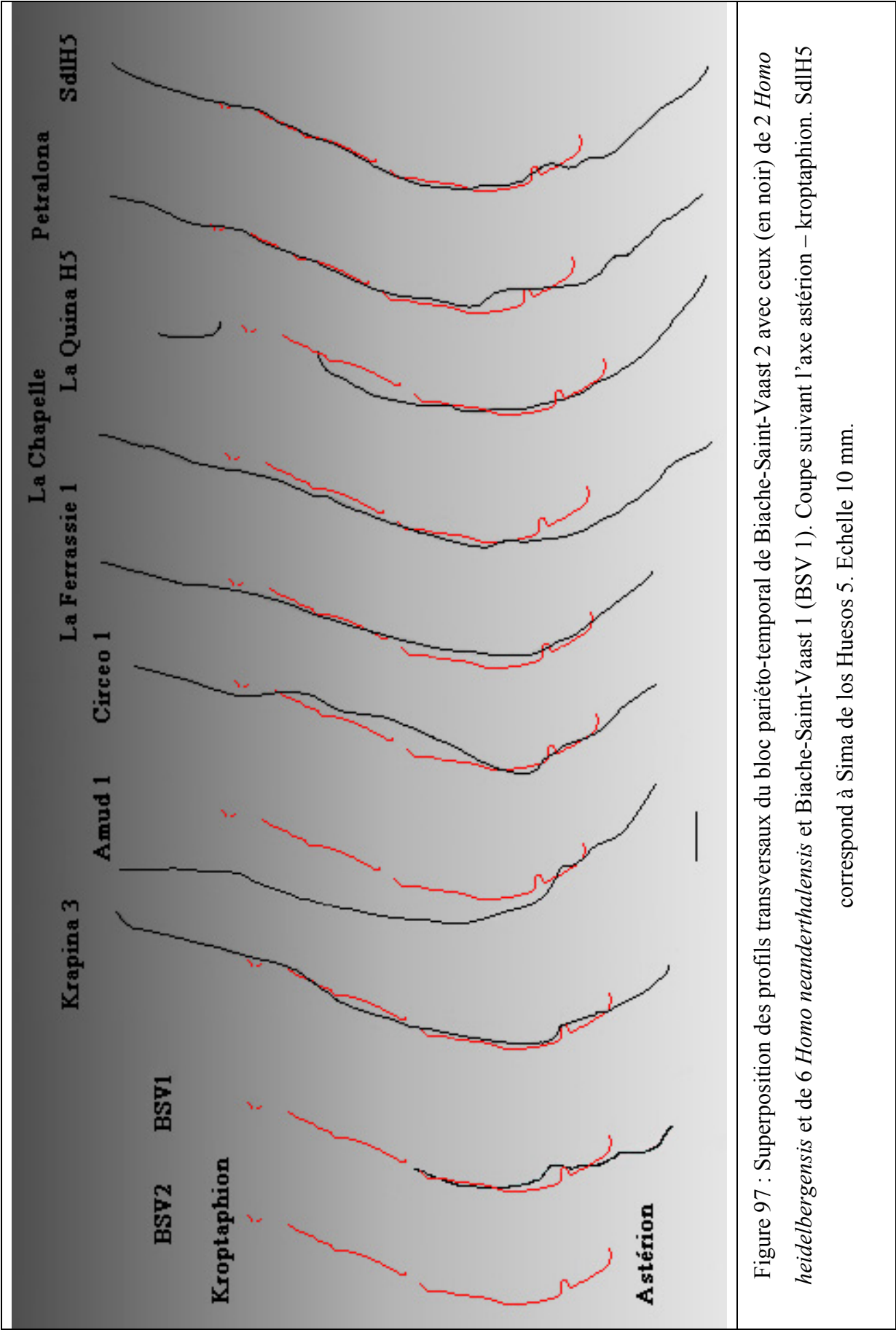
Amud 1 présente un contour différent de celui de BSV 2. L'alignement du tracé de BSV 2 sur celui d'Amud 1 générerait deux aberrations : 1/ L'orientation du rocher trop antérieure ; 2/ L'espace dévolu à l'occipital trop petit.

Le contour de Monte Circeo 1 est en dépression par rapport à celui de BSV 2 jusqu'aux environs des lignes temporales au niveau desquelles le contour devient plus externe et plus courbé. La portion postérieure à cette courbure présente un tracé similaire à celui de BSV2.

La Quina H5 est aussi curviligne au niveau des lignes temporales, mais présente antérieurement un bloc pariéto-temporal plus externe que celui de BSV 2. Le contour de La Quina H5 est plus mousse, plus courbé.

La Chapelle-aux-Saints a une courbure générale moindre que celle de Biache-Saint-Vaast 2 avec une portion postérieure du tracé de BSV 2 qui se courbe plus tôt. La partie antérieure présente un tracé assez semblable, comme La Ferrassie 1, spécimen ayant un contour postérieur plus proche de celui de BSV 2.

Les deux spécimens étudiés les plus proches morphologiquement dans ce plan de coupe sont Krapina 3 et Sima de los Huesos 5 avec une différence postérieure au niveau de Sima de los Huesos 5.



V.4.1.5 Comparaison de caractères morphologiques

En plus des contours sagittaux, frontaux, transversaux, nous avons comparé des caractères morphologiques et anatomiques de Biache-Saint-Vaast 2 avec ceux des spécimens déjà présentés (plus Gibraltar 1 et Saccopastore 1 ; tableau 19). Nous avons recherché sur l'os frontal s'il y avait : 1/ Concordance de la forme du torus sus-orbitaire (des cavités orbitaires curvilignes surmontées d'un bourrelet orbitaire) ; 2/ Continuité du torus sus-orbitaire (absence d'une dépression glabellaire) ; 3/ Constance des épaisseurs du torus de la partie glabellaire au bord externe ; 4/ Présence d'une zone vermiculée (pour les spécimens étudiés sous forme de moulage, nous nous sommes référés aux différentes publications y faisant allusion, dont Tappen, 1978).

Nous avons aussi comparé le profil des os nasaux ainsi que la région correspondant à la largeur minimale de l'écaille frontale cérébrale (changement de courbure en vue supérieure). Nous n'avons pas comparé la forme des sinus frontaux ainsi que leur répartition en raison de l'utilisation de moulages. Pour l'os pariétal nous avons comparé les lignes temporales, la présence d'un torus angularis équivalent (même bombement), le tracé des trois sutures au niveau de l'astérion. Nous avons aussi comparé la forme et l'orientation du processus mastoïdien et de l'apophyse zygomatique de l'os temporal.

Tableau 19 : Liste des caractères morphologiques étudiés (1 : comme BSV 2 ; 0 : différent ; / : non comparable).

	Frontal						Pariétal					Temporal		Total
	Torus						Ligne temporale					Apophyse & processus		
Fossiles	Forme	Continuité	Epaisseur	Zone vermiculée	Profil nasal	Largeur minimale	Supérieure marquée	Inférieure marquée	Torus angularis	Suture lambdatique	Astérion	Mastoïde	Zygomatique	
Krapina 3	1	1	1	1	1	\	0	1	0	1	1	1	\	9
BSV 1	\	\	\	\	\	\	0	0	0	1	1	1	\	3
La Chapelle-aux-Saints	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	4
La Ferrassie 1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
La Quina H5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Gibraltar 1	1	1	1	\	1	0	0	0	0	0	0	0	\	4
Saccopastore 1	\	\	\	\	\	0	0	0	0	0	0	1	\	1
Monte Circeo 1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Neanderthal 1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	\	\	5
Amud 1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	4
Petralona	0	1	0	\	0	1	0	0	0	0	0	\	\	2
Sima de los Huesos 5	0	1	0	\	1	1	0	0	0	1	0	0	0	4
Arago 2005	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	\	\	3

V.4.1.6 Conclusions

Nous constatons, au travers de nos comparaisons, que le crâne de Krapina 3 est le plus semblable aux fragments de Biache-Saint-Vaast 2. Le choix de ce crâne comme référence va nous permettre d'orienter le bloc frontal par rapport au bloc pariéto-temporal.

Afin d'obtenir un occipital pour notre chimère nous avons décidé d'utiliser les fragments postérieurs de Biache-Saint-Vaast 1. Les similitudes sont nombreuses entre les os pariétaux, les sutures lambdiques, la forme des astérions, et la relative complémentarité de la portion restante du foramen magnum de Biache-Saint-Vaast 2. En utilisant cet occipital, nous choisissons de donner un chignon occipital à BSV 2.

V.4.2 Proposition de reconstitution virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2

La difficulté pour reconstituer le crâne du deuxième individu de Biache-Saint-Vaast réside dans le positionnement des pièces isolées et dans les modalités de reconstruction. Il nous faut définir si les fragments de l'os frontal et du pariétal gauche peuvent être articulés ou non, et si oui, suivant quelles orientations.

Si nous adoptons l'hypothèse de correspondance et d'articulation des deux blocs fragmentaires, la zone de contact effective est limitée à 2 centimètres. Le choix des positions possibles est limité. Nous avons procédé à divers essais d'assemblage virtuel. Aucun essai n'a permis d'atteindre une connexion anatomique acceptable (non alignement des os, torsion de l'écaille frontale,...). Ceci nous a amené à envisager la non continuité des pièces frontale et pariétale.

Nous avons constaté une mauvaise articulation des fragments antérieurs du pariétal gauche et de la facette temporale de la grande aile du sphénoïde gauche. Nous avons procédé au découpage virtuel de ces fragments que nous avons ensuite réalignés sur le bloc pariéto-temporal (figure 98). Afin de réaliser cette étape nous avons modélisé tridimensionnellement le spécimen néandertalien de Krapina 3 afin d'avoir un support virtuel de référence. Les fragments antérieurs de l'os pariétal ont été ramenés vers l'intérieur tandis que les fragments de sphénoïde ont été décalés vers l'extérieur.

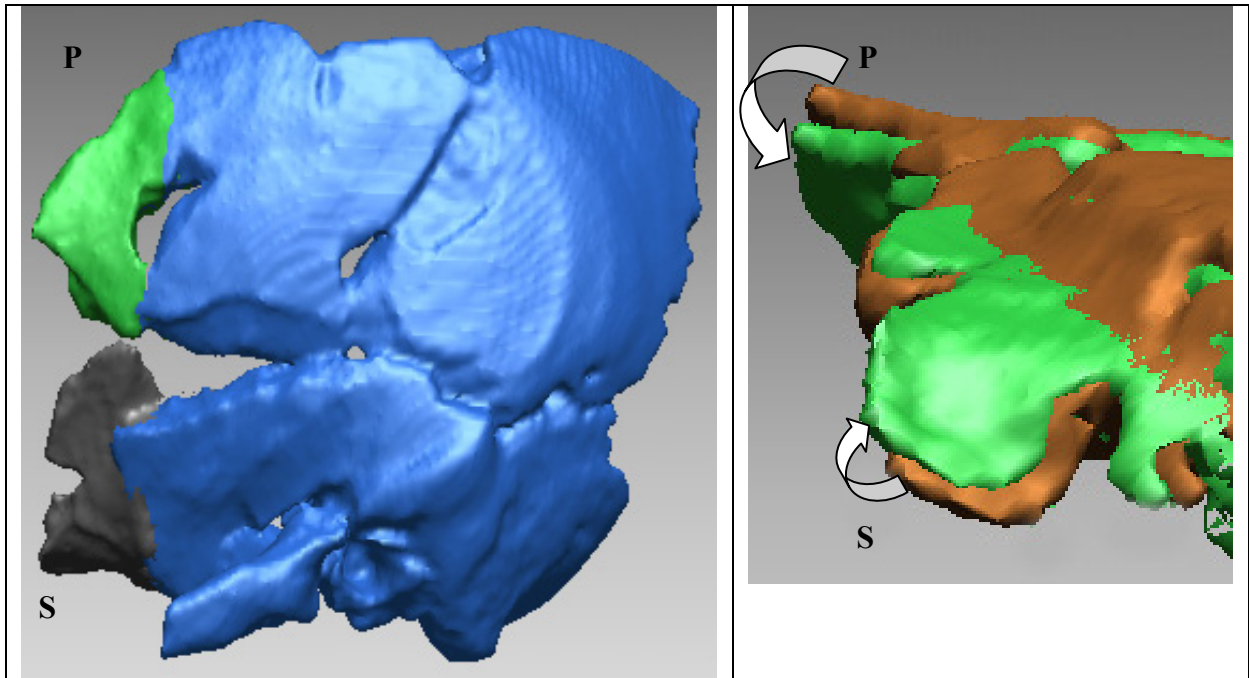


Figure 98: Nouveau positionnement virtuel des extrémités antérieures du bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 ; P : Pariétal ; S : Sphénoïde.

Pour positionner ensemble le pariéto-temporal et le frontal remaniés nous avons utilisé le spécimen Krapina 3 comme référence. Celui-ci ne possédant que le pariétal droit, nous avons inversé la modélisation de Krapina 3 pour obtenir un pariétal gauche. Nous avons réaligné les arcades orbitaires de BSV 2 suivant celles de Krapina 3 dans les différents plans x, y, z. Nous avons ensuite aligné dans le plan sagittal l'écaille frontale ainsi que la zone nasale du frontal (figure 99).

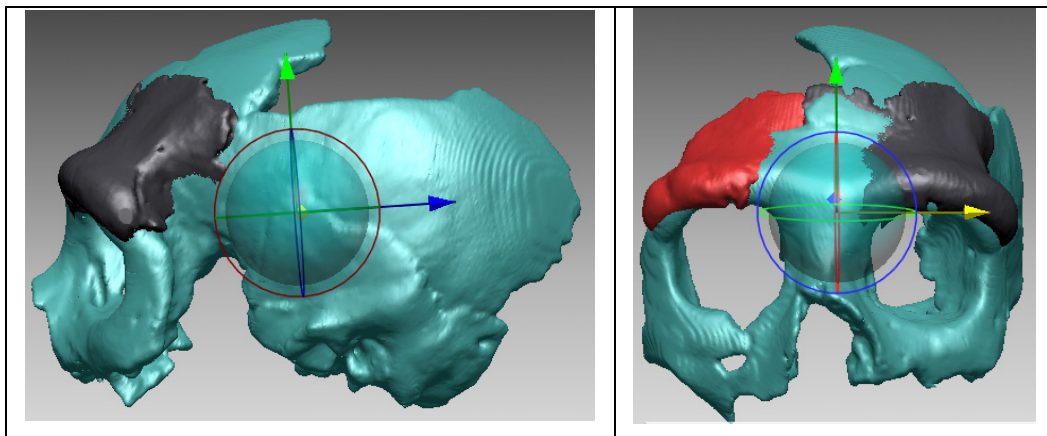


Figure 99: Superposition virtuelle du crâne de Krapina 3 (bleu) et du frontal de BSV 2 en vues latérale gauche et de face.

Nous avons ensuite aligné le bloc pariéto-temporal de BSV 2 par rapport au bloc frontal. Nous avons dans une première étape aligné le porion de BSV 2 et de Krapina 3 ainsi que l'apophyse zygomatique et les tracés des sutures lambdatiques et pariéto-temporales. Les individus étant différents, malgré les ressemblances précédemment indiquées, nous avons dû procéder à des retouches de positionnement (figure 100). Nous avons réalisé ces retouches en utilisant : 1/ Les courbures de la facette temporale de l'os frontal ; 2/ Les courbures de la portion antérieure de l'os pariétal ; 3/ La facette temporale de la grande aile du sphénoïde gauche. Nous présentons en figure 101 deux vues de cette région, qui illustrent la continuité de courbure entre l'os frontal et l'os pariétal (sans articulation directe).

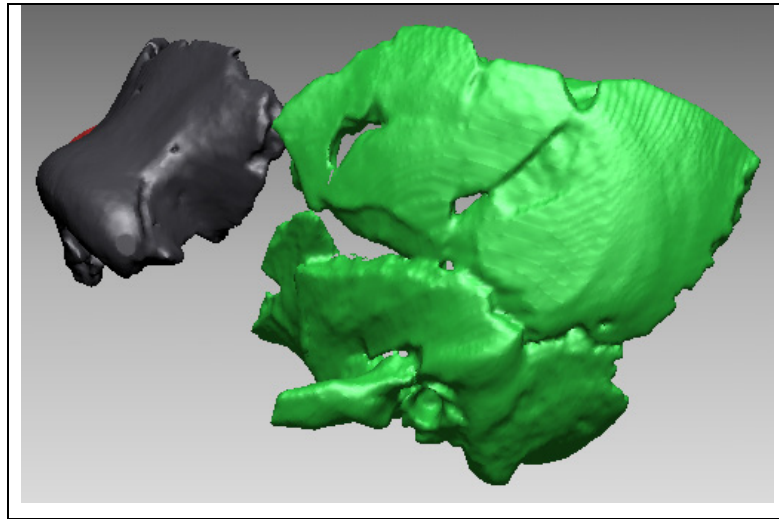


Figure 100 : Os frontal et bloc pariéto-temporal de BSV 2 en position anatomique.

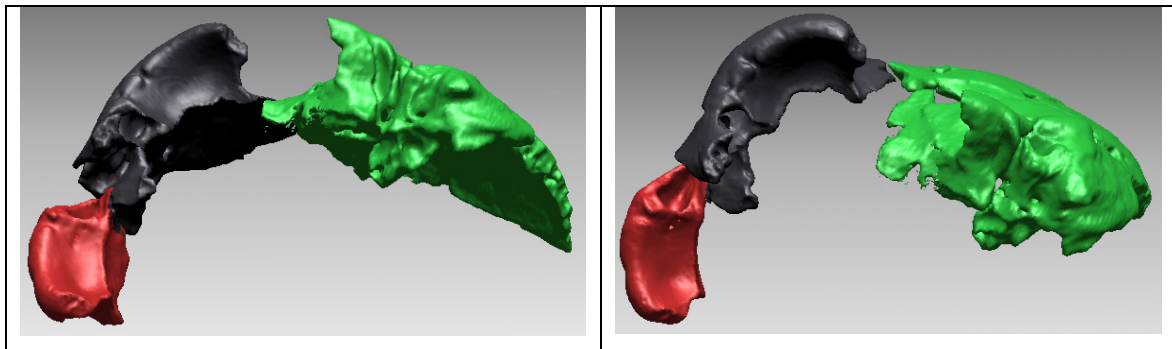


Figure 101 : Deux vues inférieures du frontal et du bloc pariéto-temporal de BSV 2.

Nous avons ensuite intégré l'occipital de Biache-Saint-Vaast 1. Ce crâne étant déformé et asymétrique, nous avons symétrisé l'hémicrâne droit suivant l'axe sagittal. Ce côté est le

mieux préservé et présente la plus grande surface d'os pariétal. Cette symétrisation permet d'obtenir en coupe frontale le contour de la voûte bipariétale (figure 102).

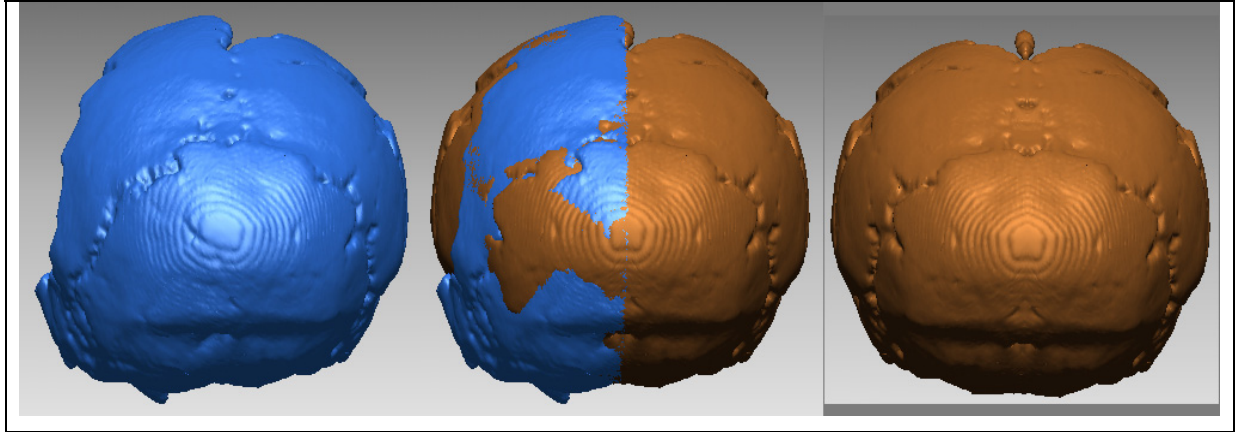


Figure 102: Modélisation virtuelle de Biache-Saint-Vaast 1 avant et après symétrisation du côté droit.

Nous avons ensuite aligné ce nouveau bloc pariéto-temporo-occipital avec le bloc pariéto-temporal-sphénoïde de Biache-Saint-Vaast 2. Nous n'avons pas pu utiliser le porion de BSV 1. Nous nous sommes donc fondé sur les tracés des sutures lambdatiques et pariéto-temporales, sur la courbure frontale et longitudinale de ces deux blocs ainsi que la partie postérieure du rocher de BSV 1 (figure 103) et l'axe sagittal défini par le bloc frontal de BSV 2.

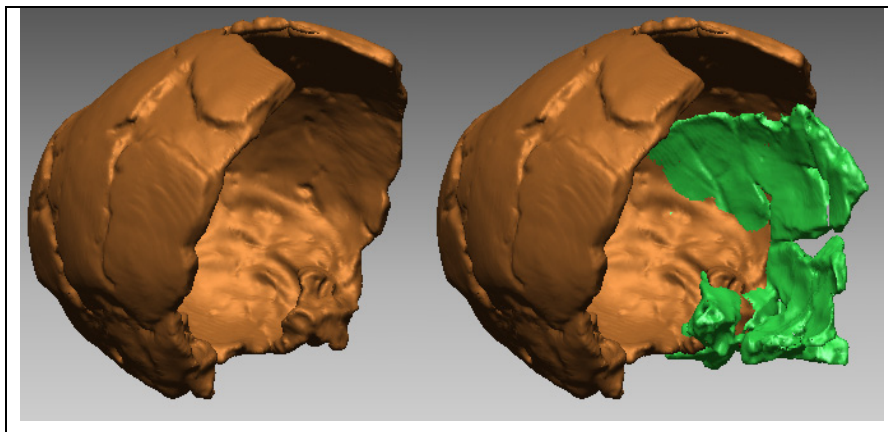


Figure 103: Intégration du bloc pariéto-temporo-occipital de BSV1 au bloc pariéto-temporal-sphénoïde de BSV 2.

Cette intégration du bloc postérieur de BSV 1 permet avec l'os frontal de BSV 2 de modéliser l'axe sagittal de notre chimère. Nous avons ainsi symétrisé les fragments pariéto-temporaux de BSV 2 pour obtenir leur image droite.

Nous avons ensuite intégré et positionné l'apophyse basilaire et la portion antérieure du foramen magnum de BSV 2 en nous fondant sur les fragments des fosses jugulaires de BSV 1 et l'échancrure jugulaire gauche de BSV 2. Nous n'avons pas de contact direct entre l'échancrure jugulaire et la fosse jugulaire correspondante mais nous pouvons faire correspondre les fragments. Nous avons terminé le positionnement de la portion antérieure du foramen magnum en l'articulant avec la zone complémentaire de BSV 1 (figure 104).

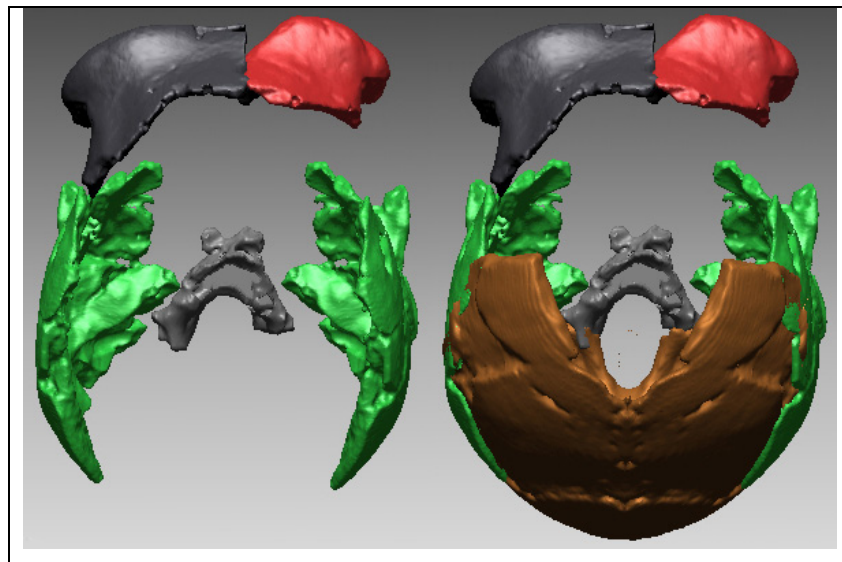


Figure 104 : Deux vues supérieures de la chimère BSV 2 en cours de réalisation, avec et sans l'occipital modifié de BSV 1.

Quelques disparités peuvent être relevées au niveau de la jonction entre BSV 1 et BSV2, les deux individus présentant quelques différences de taille (BSV 2 devait être un peu plus large, peut être en raison d'un dimorphisme sexuel).

Nous avons continué le travail de modélisation de la chimère en prolongeant l'écaille pariétale supérieure. Cette opération a nécessité le prélèvement virtuel de la portion antéro-supérieure du pariétal gauche de Biache-Saint-Vaast 1, non utilisée précédemment. Ce fragment a été symétrisé suivant le plan sagittal après l'avoir positionné au préalable sur notre chimère.

Nous avons ensuite réalisé une écaille frontale virtuelle afin d'obtenir l'articulation entre l'os frontal de BSV 2 et le bloc pariéto-temporo-occipital de BSV 1-BSV 2, ainsi qu'une face complète. Nous avons donc modifié le frontal de Krapina 3 par la méthode de déformation libre des polygones. Il a fallu procéder à la surrection du bregma et des stéphanions et abaisser légèrement l'écaille à sa base. Nous avons utilisé la courbure de l'écaille frontale cérébrale de Biache-Saint-Vaast 2.

La reconstitution virtuelle de la face a été possible jusqu'au niveau de la largeur bijugale. En utilisant les largeurs bi-fronto-malaires orbitaire et temporale et la zone naso-frontale de BSV2, il est possible de proposer une hypothèse sur la forme théorique des arcades orbitaires. Le positionnement du temporal et de son symétrique permet d'obtenir l'orientation du processus zygomatique. Il est ainsi possible, par recoupement, de définir la position théorique de la largeur maximale de la face.

Nous avons ensuite réalisé un bloc maxillo-facial en déformant le bloc maxillo-malaire de La Ferrassie 1 au moyen de la même méthode de déformation (figure 105). La portion inférieure de la face n'a été réalisée que pour proposer une chimère complète. L'intégration virtuelle du maxillaire et des os malaires du spécimen La Ferrassie 1 n'a nécessité aucune modification, à l'exception des arcades zygomatiques modifiées par la méthode de déformation libre des polygones (figure 86).

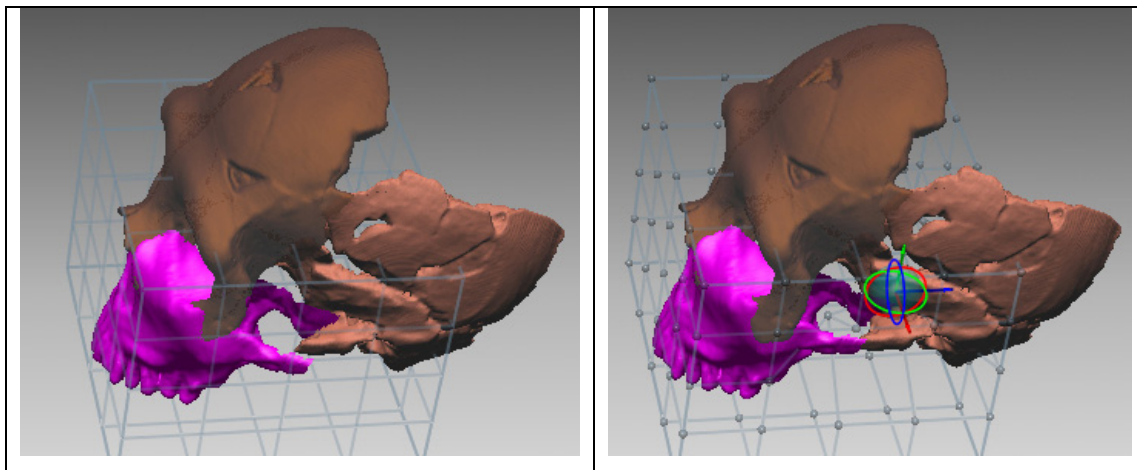


Figure 105 : Déformation virtuelle des polygones, utilisée pour intégrer le bloc maxillo-malaire de la Ferrassie 1.

Le résultat de notre proposition de reconstitution de ce fossile fragmentaire Biache-Saint-Vaast 2 est présenté en figures 106 à 111.

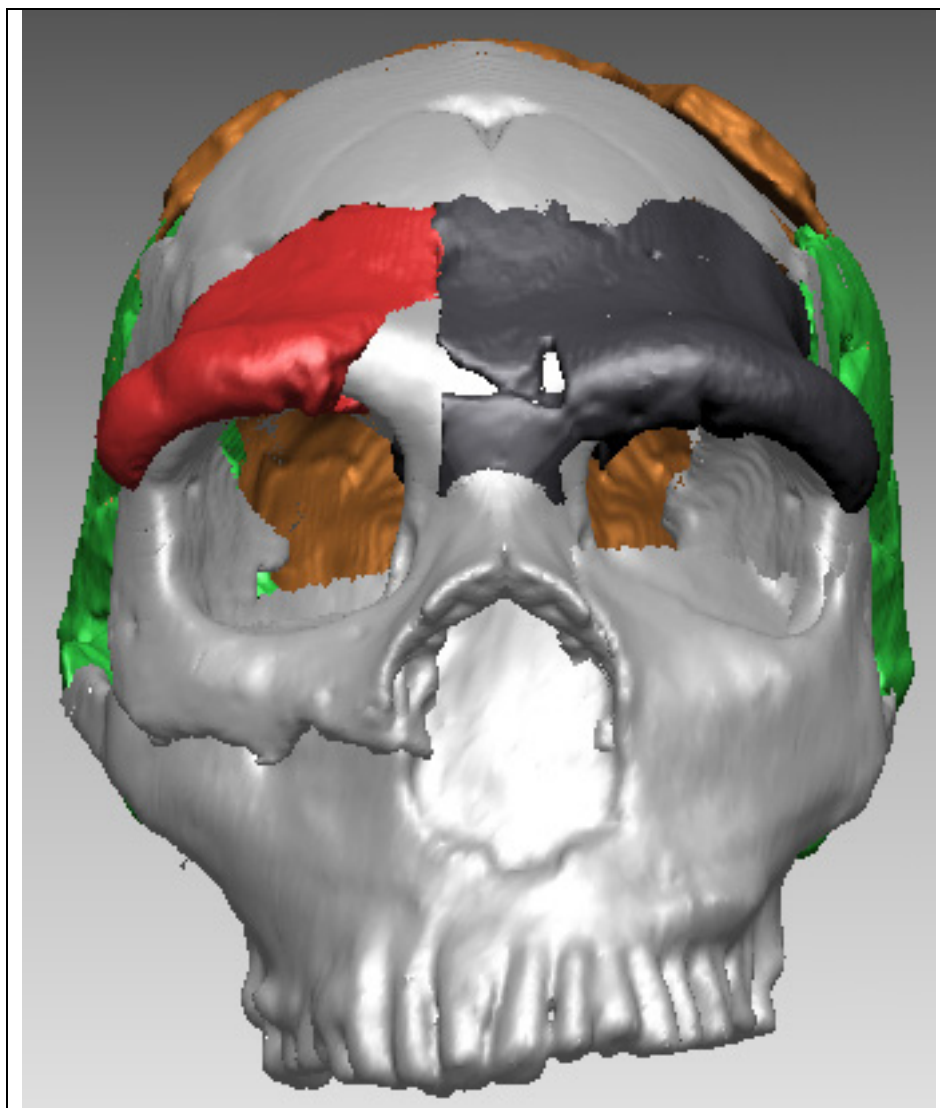


Figure 106 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue frontale.

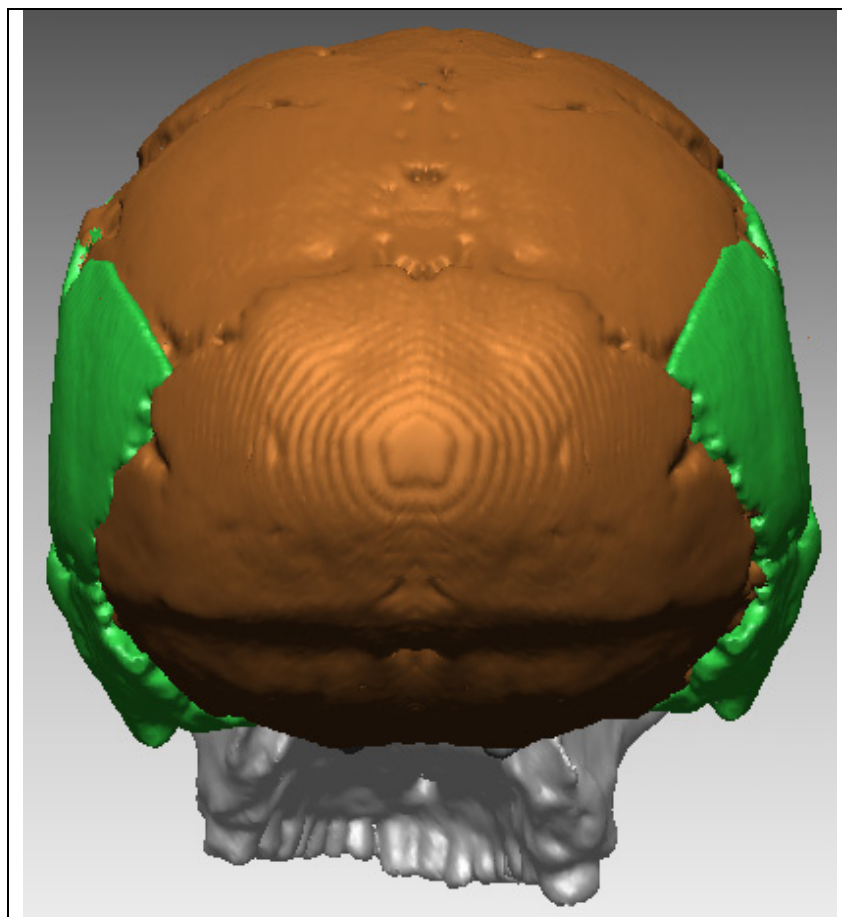


Figure 107 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue postérieure.

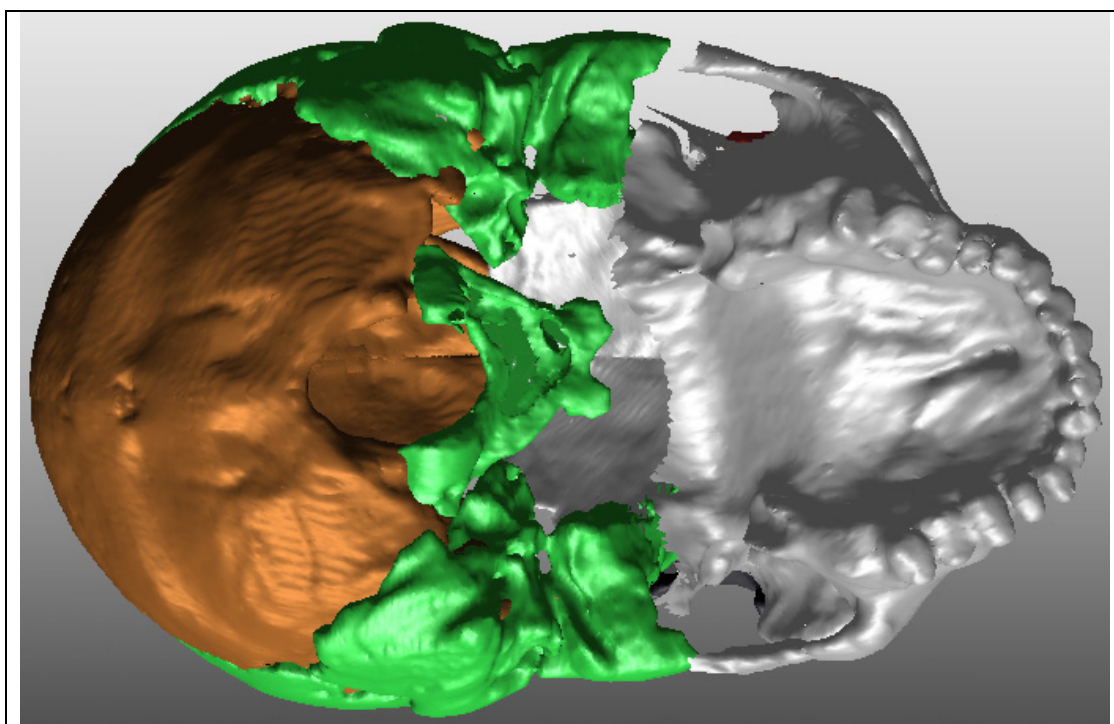


Figure 108 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue inférieure.

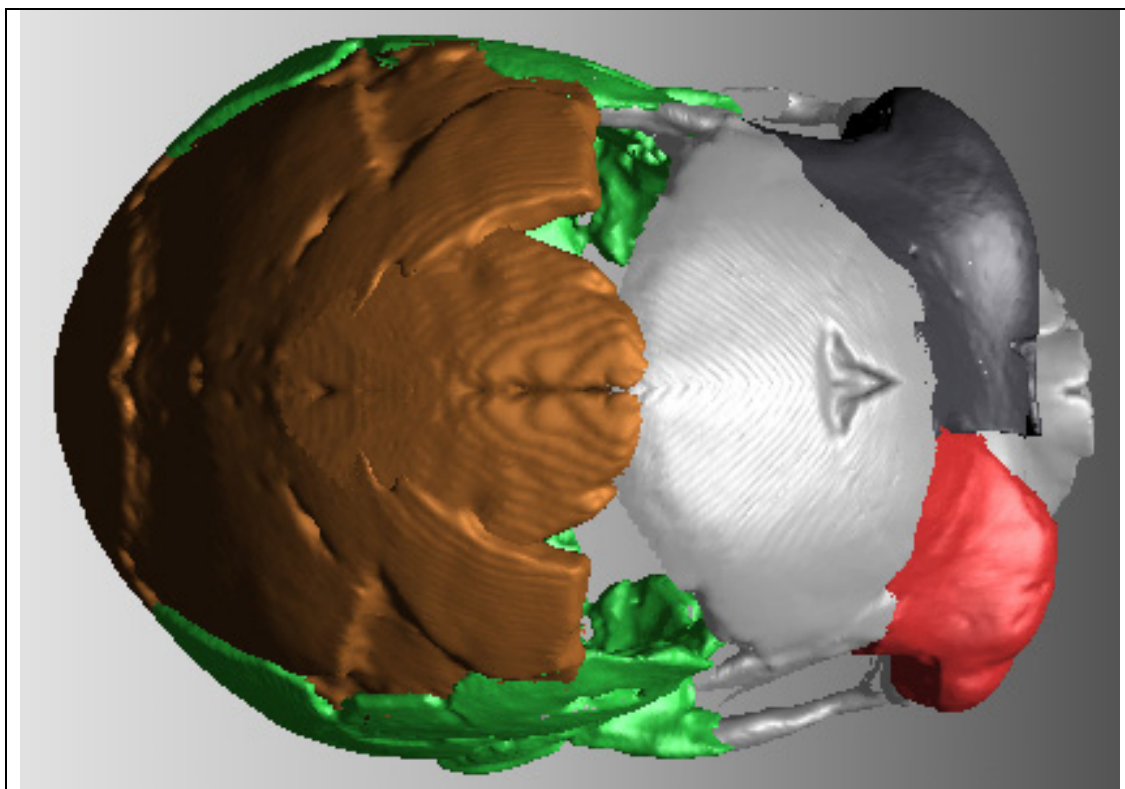


Figure 109 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue supérieure.

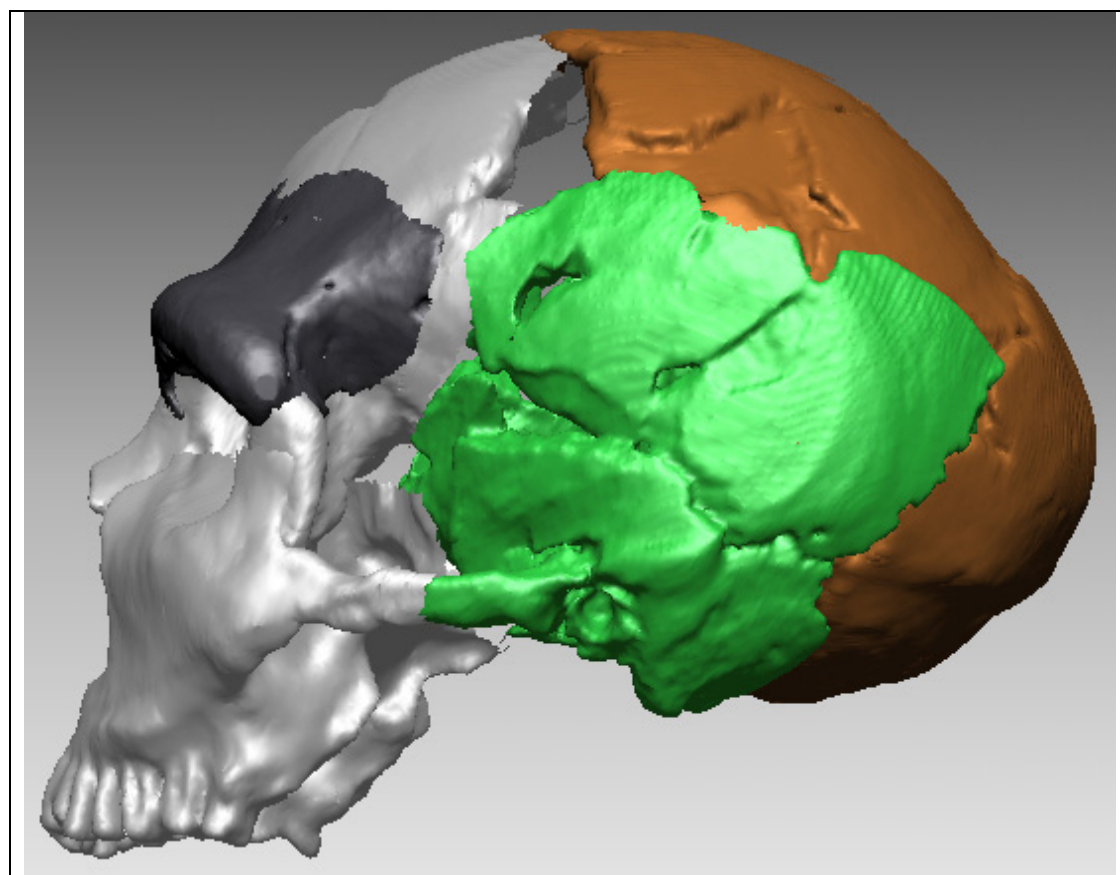


Figure 110 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue latérale gauche.

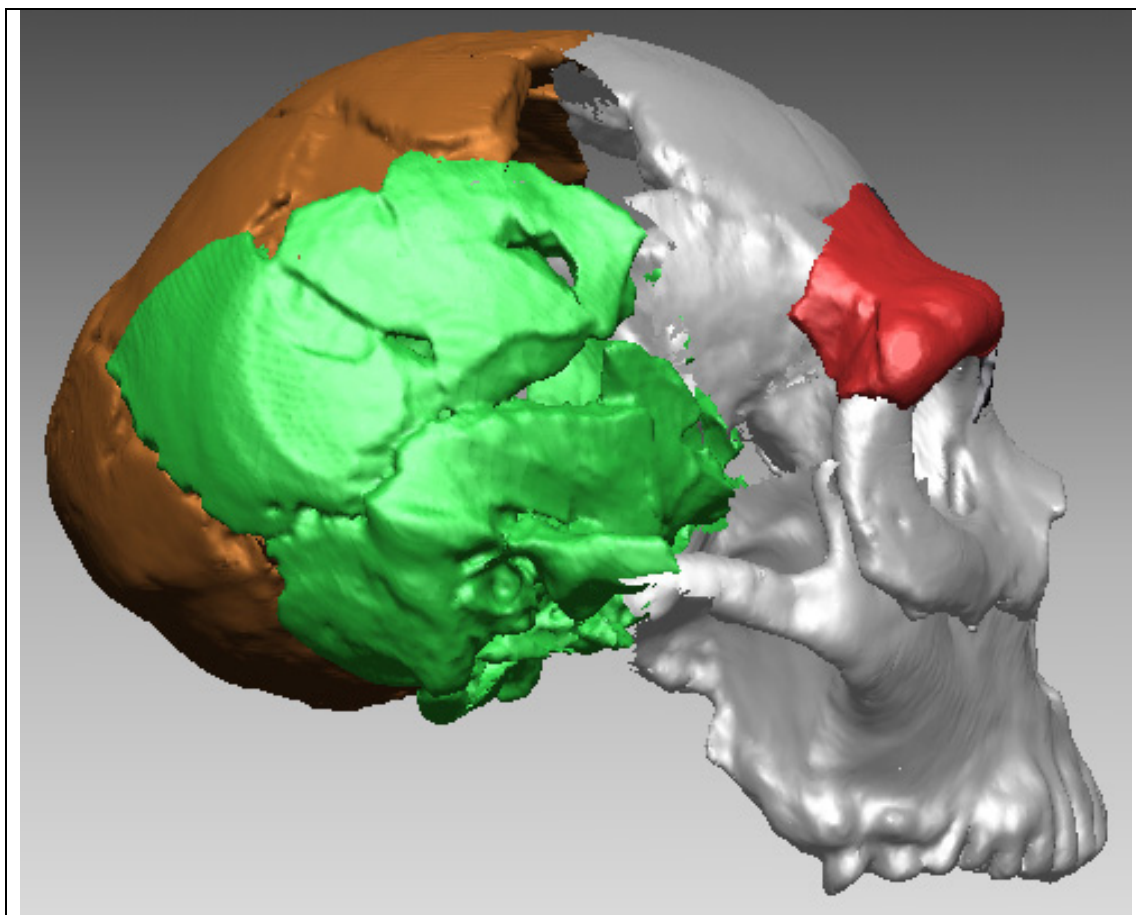


Figure 111 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue latérale droit.

V.5 Résultats et comparaisons de la proposition de reconstitution virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2, BSV 2

V.5.1 Description anatomique de la reconstruction virtuelle BSV 2

Notre travail de reconstruction du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 a été limité au positionnement des différents fragments frontaux, pariétaux, temporaux, sphénoïdes et occipitaux retrouvés (figure 112).

L'intégration de l'os occipital de Biache-Saint-Vaast 1 constitue une source supplémentaire d'information et permet d'obtenir la longueur de la calotte crânienne de la chimère. La réalisation de l'écaille frontale et d'une face à partir des arcades orbitaires correspond à un travail de finition de la chimère (figure 113).

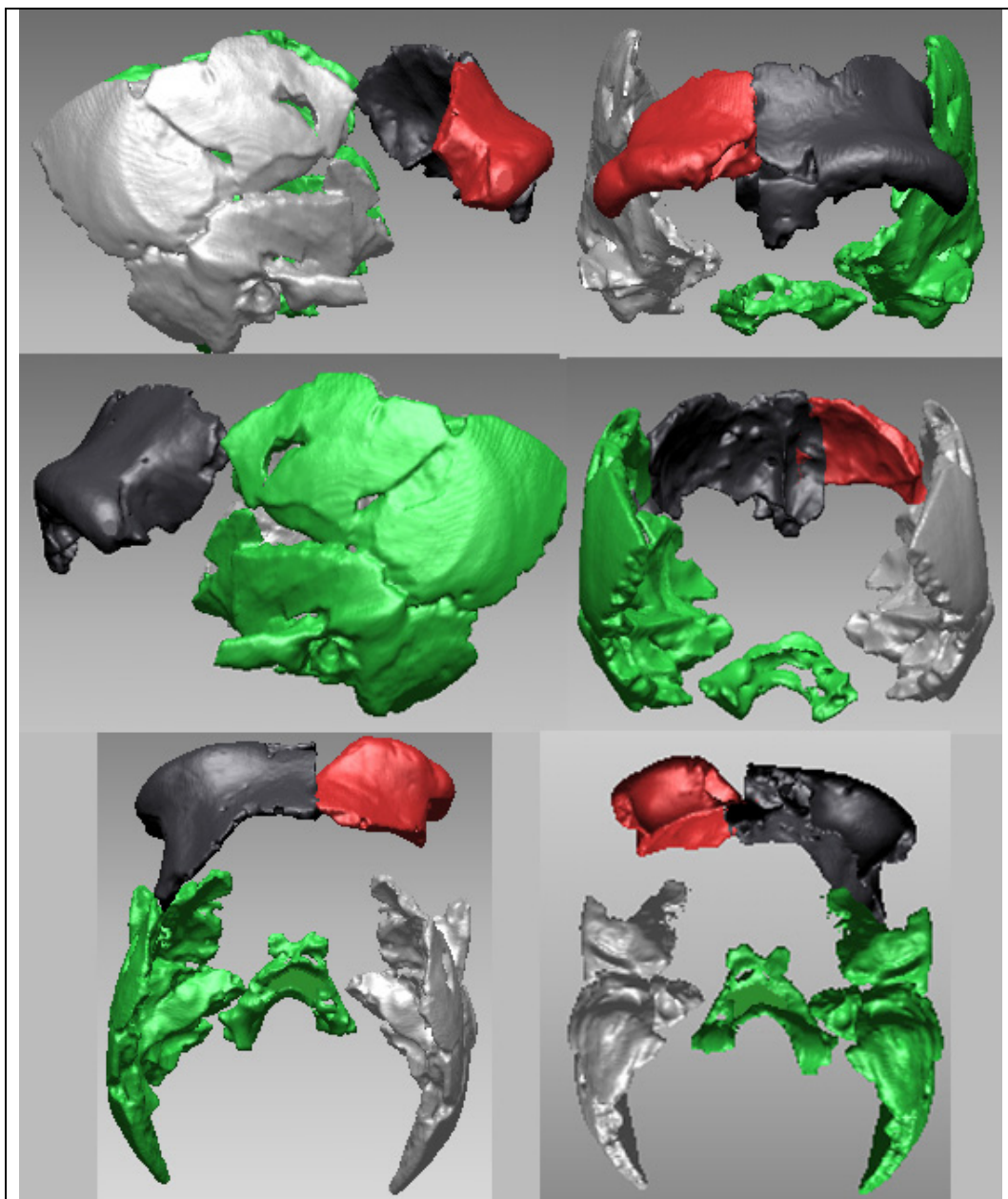


Figure 112 : Différentes vues virtuelles des fragments de Biache-Saint-Vaast 2 avec symétrisation du bloc pariéto-temporal gauche.

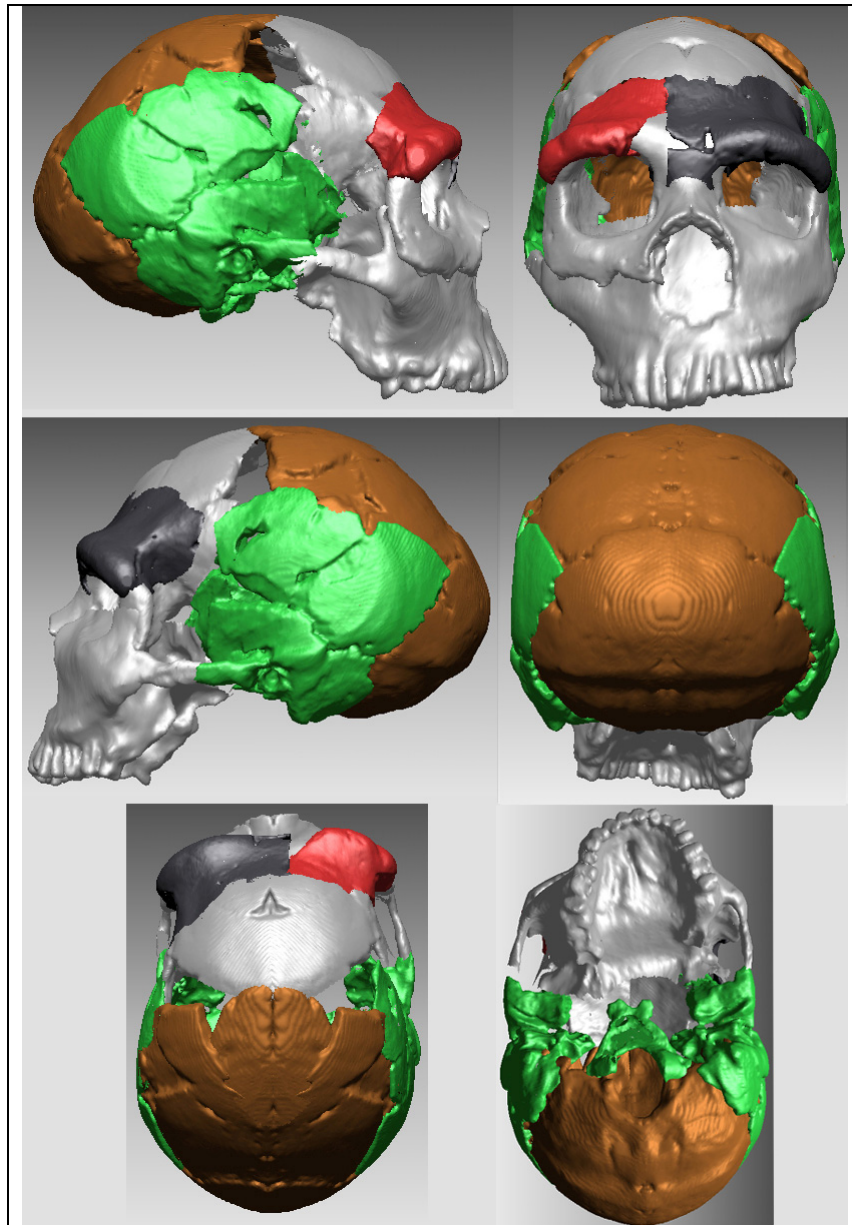


Figure 113 : Différentes vues de la chimère virtuelle Biache-Saint-Vaast 2.

Les fragments pariétaux temporaux de BSV 2 de notre chimère ne jouxtent pas parfaitement avec l'occipital symétrisé de BSV 1. Ceci est dû au fait que nous avons utilisé deux spécimens de morphologie proche (le bloc occipito-temporo-pariétal de BSV 1 présente les mêmes courbures et se positionne parfaitement entre les deux pariétaux de BSV 2), mais qui présentent tout de même quelques différences. Ces différences pourraient être liées à un dimorphisme sexuel, ou à la variabilité inter-individus.

Le bloc frontal et le bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 se recouvrent sans être directement juxtaposables (figure 114). Un hiatus subsiste entre les deux fragments. Nous considérons que les fragments devaient être extrêmement proches, mais sans contact direct.

La distance minimale entre l'écaille extérieure du frontal et du pariétal est de 2 mm. L'écart entre la surface interne de cassure du pariétal et celle correspondant sur le frontal est de 1,5mm.

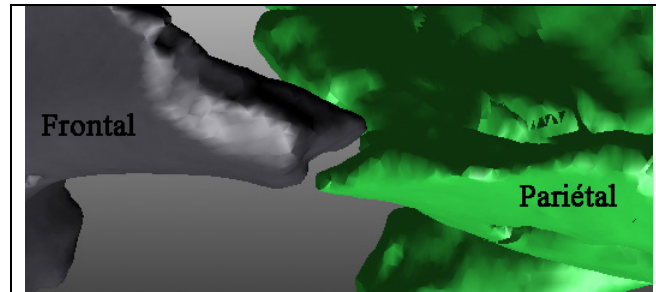


Figure 114 : Zone de la suture coronale de Biache-Saint-Vaast 2, vue supérieure.

En utilisant l'occipital gauche symétrisé de Biache-Saint-Vaast 1, nous avons pris pour hypothèse vraie l'existence d'un chignon occipital, créant ainsi un crâne de type néandertaloïde. Ceci nous paraît être le meilleur choix en raison :

- 1/ De la ressemblance des zones conservées chez chacun des individus ;
- 2/ De leur quasi-complémentarité ;
- 3/ Du changement de courbure de l'écaille pariétale au niveau de l'extrémité supérieure de la suture lambdatique (figure 115).

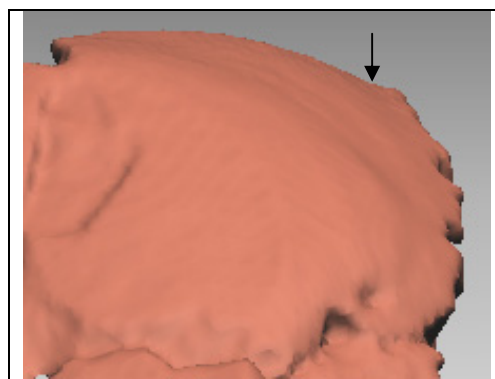


Figure 115 : Début de la dépression pré-lambdatique.

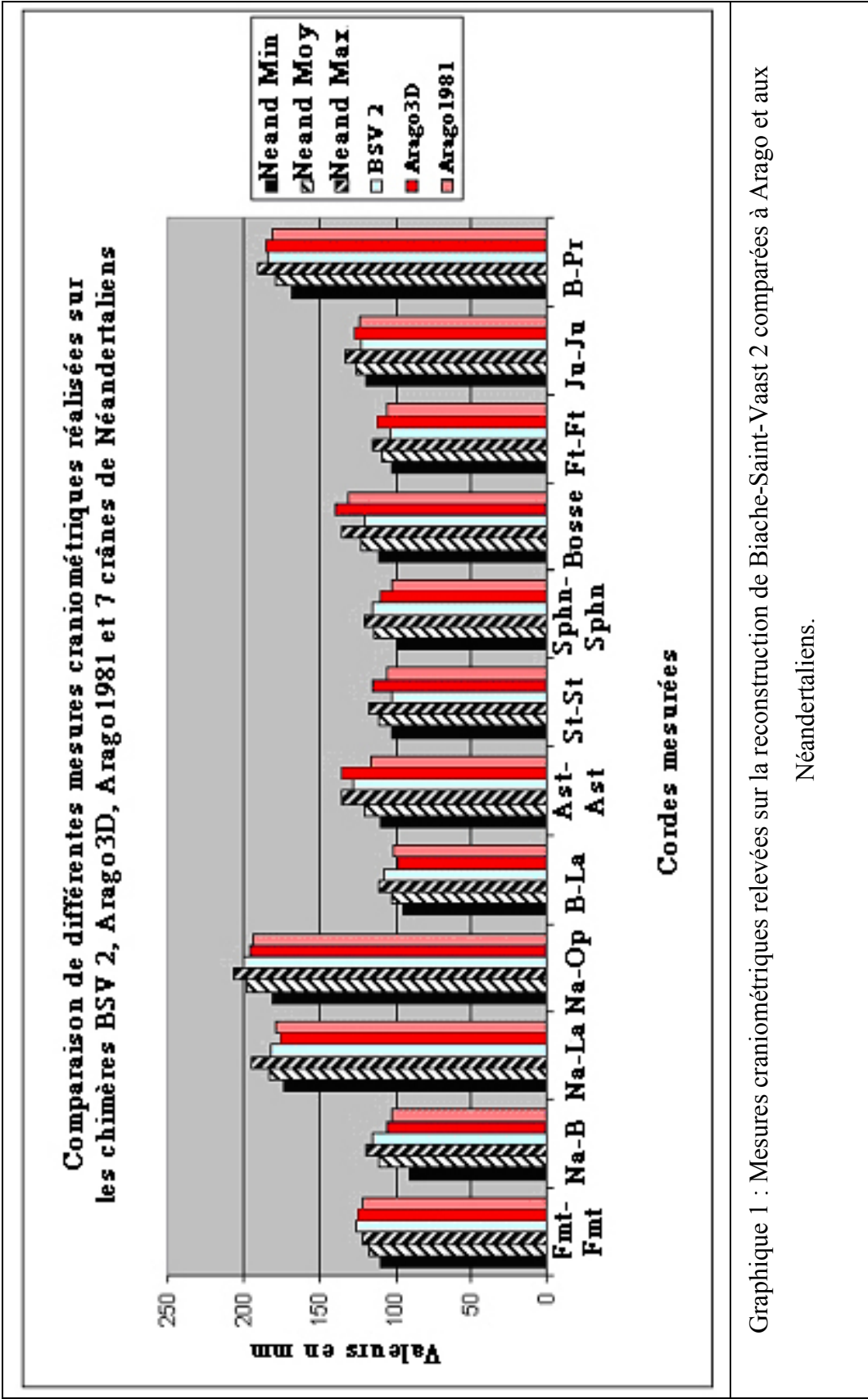
V.5.2 Valeurs métriques relevées sur la chimère Biache-Saint-Vaast 2

Nous avons relevé différentes mesures sur la reconstitution virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2 (tableau 20). Certaines valeurs comme la hauteur bregma – prosthion ne sont présentées qu'à titre indicatif, le maxillaire ayant été créé artificiellement pour terminer la chimère.

Tableau 20 : Mesures virtuelles réalisées sur notre proposition de chimère de Biache-Saint-Vaast 2 (points craniométriques selon Martin *et al.*, 1957).

Mesures	Reconstitution de BSV 2
Largeur Fmt-Fmt (M43)	125,6 mm
Largeur biorbitaire interne	115,4 mm
Largeur du torus orbitaire (M43')	128,7 mm
Largeur frontale minimale (M9)	104,4 mm
Contraction post-orbitaire (I72') →(M9/M43')*100	81,1
Largeur frontale maximale (M10)	112,6 mm
Divergence de l'écaille (I12) →(M9/M10)*100	92,7
Largeur bisphénique	114,7 mm
Largeur bistéphanique	103,2 mm
Largeur bijugale	122,6 mm
Largeur biastérique (M12)	128,8 mm
Largeur pariétale maximale (M8)	114,7 mm
Largeur biporion	124,2 mm
Largeur Bosses pariétales	120,4 mm
Largeur maximale neurocrâne	151 mm
Angle Sphn-St-B	133,4°
Angle As-La-As	85,2°
Angle Na-Ba-La	102,4°
Hauteur Ba-Na	115,6 mm
Hauteur Ba-B	133 mm
Hauteur Ba-Sa	126,5 mm
Hauteur B-Pr	184,8 mm
Corde Gl-Op	200,6 mm
Corde Na-Op	199,7 mm
Corde Na-La	182,6 mm
Corde B-La (M30)	107,6 mm
Corde B-Na	114,6 mm
Corde Po-As	46 mm
Corde Sphn-As (gauche)	90,9 mm
(Corde Sphn-As/M30)*100	84,5
Corde Sphn-B	91,6 mm

Ces valeurs sont toutes comprises entre les valeurs minimales et maximales des Néandertaliens étudiés (La Chapelle-aux-Saints, Neanderthal 1, Amud 1, La Ferrassie 1, La Quina H5, Monte Circeo 1, Saccopastore 1) à l'exception de la largeur maximale du torus frontal (graphique 1).



Graphique 1 : Mesures craniométriques relevées sur la reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2 comparées à Arago et aux Néandertaliens.

Notre chimère du crâne de BSV 2 est comprise entre la valeur minimale et la valeur moyenne des Néandertaliens pour les cordes bistéphanique, bijugale, entre les bosses

pariétales et pour la valeur frontale minimale. Nous présentons pour comparaison les valeurs relevées sur notre proposition Arago3D.

V.5.3 Comparaison virtuelle de notre proposition de chimère de Biache-Saint-Vaast 2 avec d'autres crânes d'Hominidés fossiles

V.5.3.1 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec le crâne de La Ferrassie 1

Nous avons superposé virtuellement le crâne de La Ferrassie 1 avec notre proposition de chimère de Biache-Saint-Vaast 2 (figure 116). Cette dernière présente une dépression glabellaire plus marquée que celle de La Ferrassie 1. L'écaille frontale de celui-ci est avancée et plus longue que celle de notre reconstitution de BSV 2. L'occipital de BSV 2 est plus allongé que celui de La Ferrassie 1 avec un chignon occipital pour BSV 2 plus marqué que celui de ce Néandertalien.

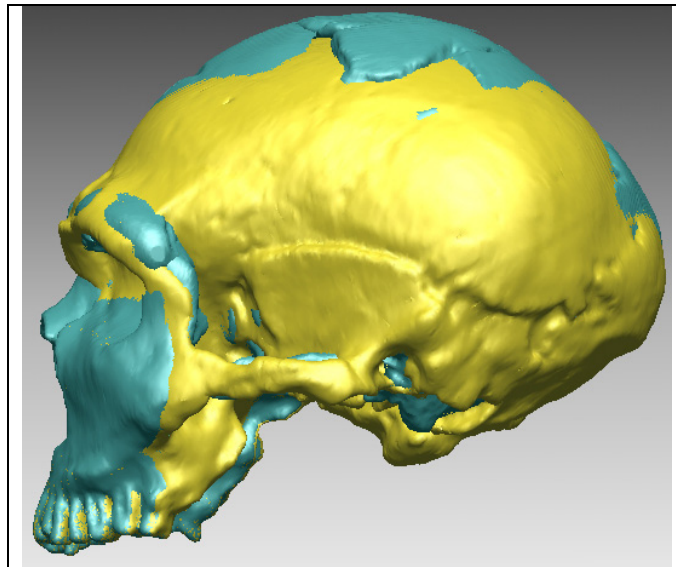


Figure 116 : Superposition virtuelle de la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 et de celui de La Ferrassie 1, vue latérale.

Le fragment occipital de Biache-Saint-Vaast 2 avec l'apophyse basilaire permet de comparer les hauteurs du neurocrâne de la chimère et de celui de La Ferrassie 1. Ces hauteurs sont sensiblement similaires (135,9 mm pour La Ferrassie 1 contre 133 mm pour BSV 2). La seule véritable différence entre les deux individus provient du positionnement de l'os frontal, moins antérieur que celui de La Ferrassie 1 (section différente), ce qui donne une longueur crânienne maximale supérieure pour La Ferrassie 1 (corde nasion – opisthocranion de 201,4 mm pour La Ferrassie 1 contre 199,7 mm pour notre proposition de BSV 2).

La coupe frontale réalisée entre le porion et la mastoïde (figure 117) permet de constater la similitude de hauteur du neurocrâne de La Ferrassie 1 et de notre proposition pour Biache-Saint-Vaast 2. Par contre notre proposition est moins large au niveau de l'écaille pariétale latérale. Notre reconstruction correspond à une calotte crânienne moins courbée en vue frontale que celle de ce Néandertalien.

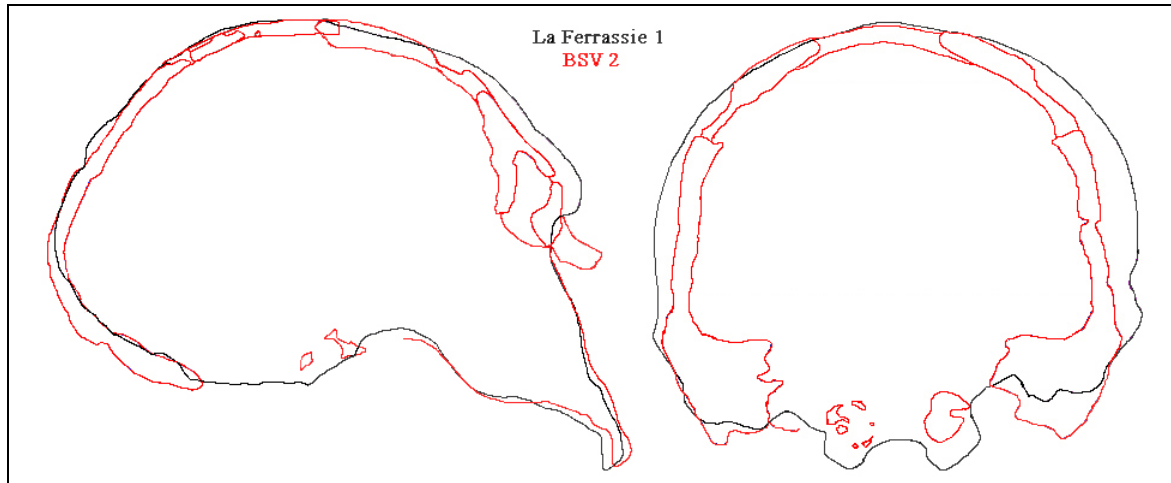


Figure 117 : Superposition du contour sagittal et frontal de Biache-Saint-Vaast 2 et La Ferrassie 1; Coupe frontale entre les porions et les mastoïdes.

La différence de conformation de la voûte bipariétale (verticalité des écailles latérales pariétales) entraîne une différence de largeur maximale en vue supérieure. La largeur maximale de la calotte crânienne de BSV 2 est basse et postérieure, au niveau de l'incisure pariétale, entre le pariétal et le temporal. Notre chimère est plus proche de la forme sphénoïde que le crâne néandertalien de La Ferrassie 1 qui est nettement rhomboïde (figure 118).

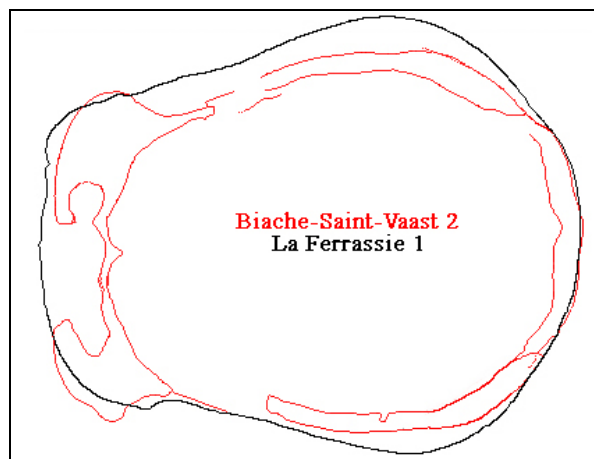


Figure 118 : Superposition des contours de Biache-Saint-Vaast 2 et La Ferrassie 1 en vue supérieure ; Coupe transversale parallèle au plan de Francfort.

Notre proposition de reconstruction de la face de Biache-Saint-Vaast 2, se basant sur l'axe des apophyses zygomatiques, sur les facettes temporales du pariétal et sur la forme des arcades orbitaires frontales, possède des arcades orbitaires de type néandertalien (arcades séparées par un espace inter-orbitaire large surmontant une cavité nasale haute et large). Comme nous l'avons expliqué précédemment, la partie inférieure de la face (maxillaire) n'est que pure hypothèse et ne sera pas commentée.

Nous avons procédé à la superposition de notre reconstruction virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2 avec La Chapelle-aux-Saints ainsi qu'avec Monte Circeo 1. Les résultats sont semblables à ceux que nous venons de présenter.

V.5.3.2 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec le crâne de Amud 1

Les différences générales entre notre proposition de Biache-Saint-Vaast 2 et Amud 1 sont du même type que celles rencontrées précédemment avec La Ferrassie 1 et les autres Néandertaliens cités (section du torus frontal différente, longueur crânienne supérieure à celle de BSV2). Par contre, Amud 1 présente une conformation de la voûte bipariétale plus proche de celle de BSV 2 avec une voûte moins curviligne en coupe frontale (figure 119), verticale au niveau de la face latérale de l'écaille pariétale.

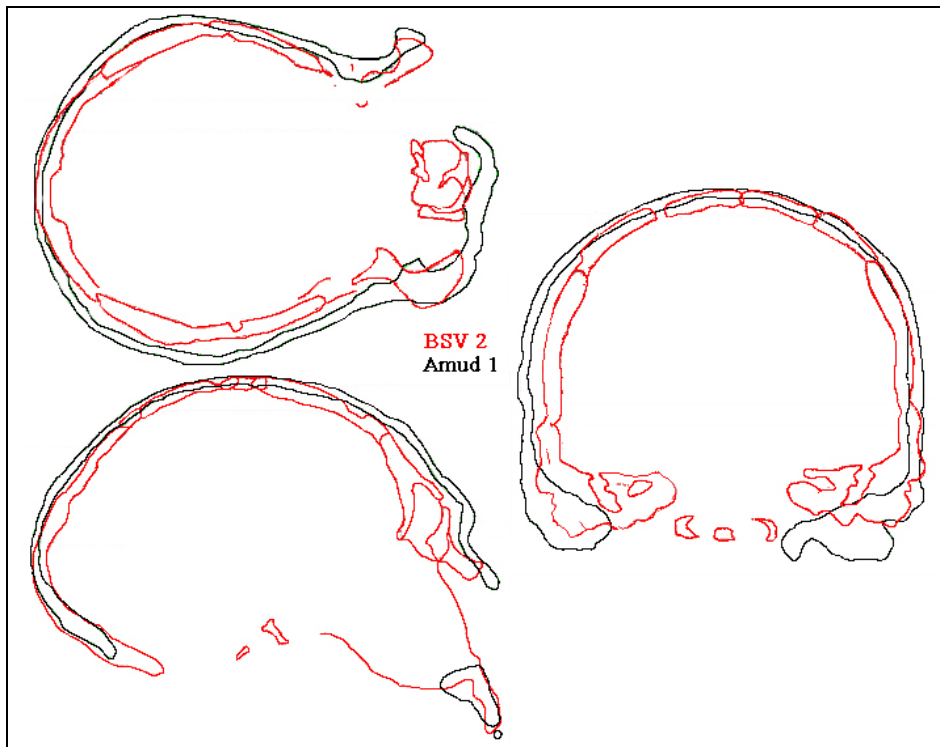


Figure 119 : Superposition des profils crâniens de Amud 1 et de notre proposition de reconstruction de BSV 2 en vue supérieure, sagittale et frontale.

Nous n'avons pas comparé notre chimère avec Krapina 3 en raison de l'état très fragmentaire de cet individu.

V.5.3.3 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec le crâne de Sima de los Huesos 5

Notre proposition de Biache-Saint-Vaast 2 diverge de Sima de los Huesos 5 par une longueur générale supérieure (corde nasion – opisthocranion de 199,7 mm contre 176,4 mm) tout comme la hauteur du neurocrâne (133 mm contre 116,1 mm pour la hauteur bregma – basion ; figure 120) et la largeur de la voûte bipariétale (largeur biastérique de 128,8 mm pour BSV 2 contre 112,6 mm).

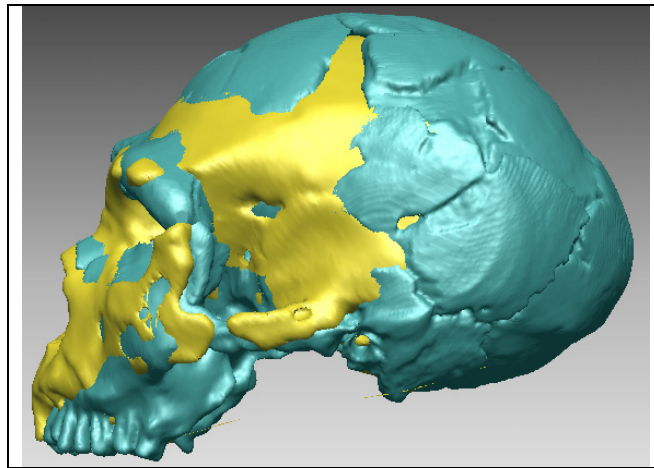


Figure 120 : Superposition virtuelle de la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 et du crâne de Sima de los Huesos 5, vue latérale.

La face de Sima de los Huesos 5 est moins allongée que celle de la chimère BSV 2. L'os frontal de BSV 2 est plus long que celui de Sima de los Huesos 5 (corde bregma – nasion de 114,6 mm pour BSV 2 et de 102,7 mm pour Sima de los Huesos 5).

La comparaison des profils frontaux (figure 121) permet de mettre en évidence une similitude d'inclinaison de la paroi latérale de l'écaille pariétale jusqu'au niveau des lignes temporales où l'écaille de Sima de los Huesos 5 apparaît plus anguleuse. Ceci contribue à donner une valeur moindre à la hauteur de la voûte.

A l'exception du plan nuchal et de la zone glabellaire et supraglabellaire, le profil sagittal de Sima de los Huesos 5 apparaît comme une reproduction réduite de celui de Biache-Saint-Vaast 2.



Figure 121 : Superposition des profils crâniens de Sima de los Huesos 5 et de notre chimère de BSV 2 en vue supérieure, sagittale et frontale.

V.5.3.4 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec notre proposition de reconstruction du crâne Arago3D

La comparaison de la chimère Biache-Saint-Vaast 2 et du crâne Arago3D est particulière (figure 122) car elle concerne deux crânes reconstitués virtuellement. Ces deux propositions réalisées indépendamment présentent des points communs et quelques divergences.

La face de Biache-Saint-Vaast 2 paraît plus longue que celle d'Arago3D mais ne peut être comparée véritablement (maxillaire hypothétique). Nous pouvons cependant comparer la largeur de la face ainsi que l'os frontal des deux individus.

L'os frontal de BSV 2 est plus allongé antéro-postérieurement (corde bregma – nasion de 114,6 mm contre 105,2mm) mais aussi large au niveau du torus frontal. Par contre la largeur frontale minimale est moindre que celle d'Arago3D (104,4 mm contre 112 mm) ce qui contribue à donner une constriction post-orbitaire plus marquée. Au niveau de la suture coronale l'écaille frontale de BSV 2 est aussi moins large (largeur maximale M10 de 112,6 mm contre 120,6 mm), donnant la même valeur d'indice de divergence de l'écaille I12.

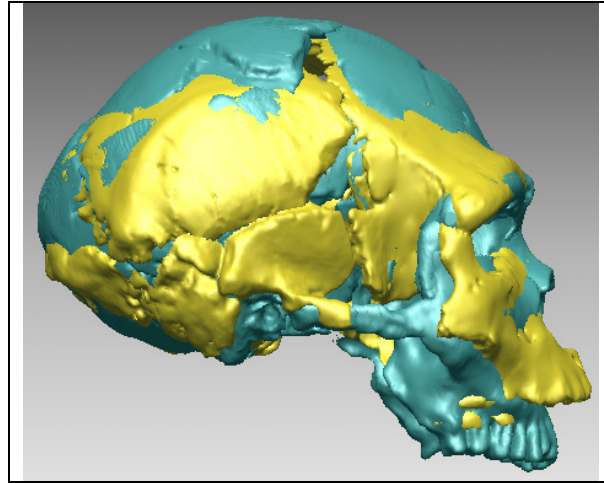


Figure 122 : Superposition virtuelle de la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 et de celui d'Arago3D, vue latérale.

Biache-Saint-Vaast 2 présente un neurocrâne plus haut (hauteur bregma – basion de 133 mm contre 118 mm ; figure 123), légèrement plus long (nasion – opisthocranion de 199,7 mm contre 196 mm) mais moins large (largeur biastérique de 128,8 mm contre 134,6 mm).

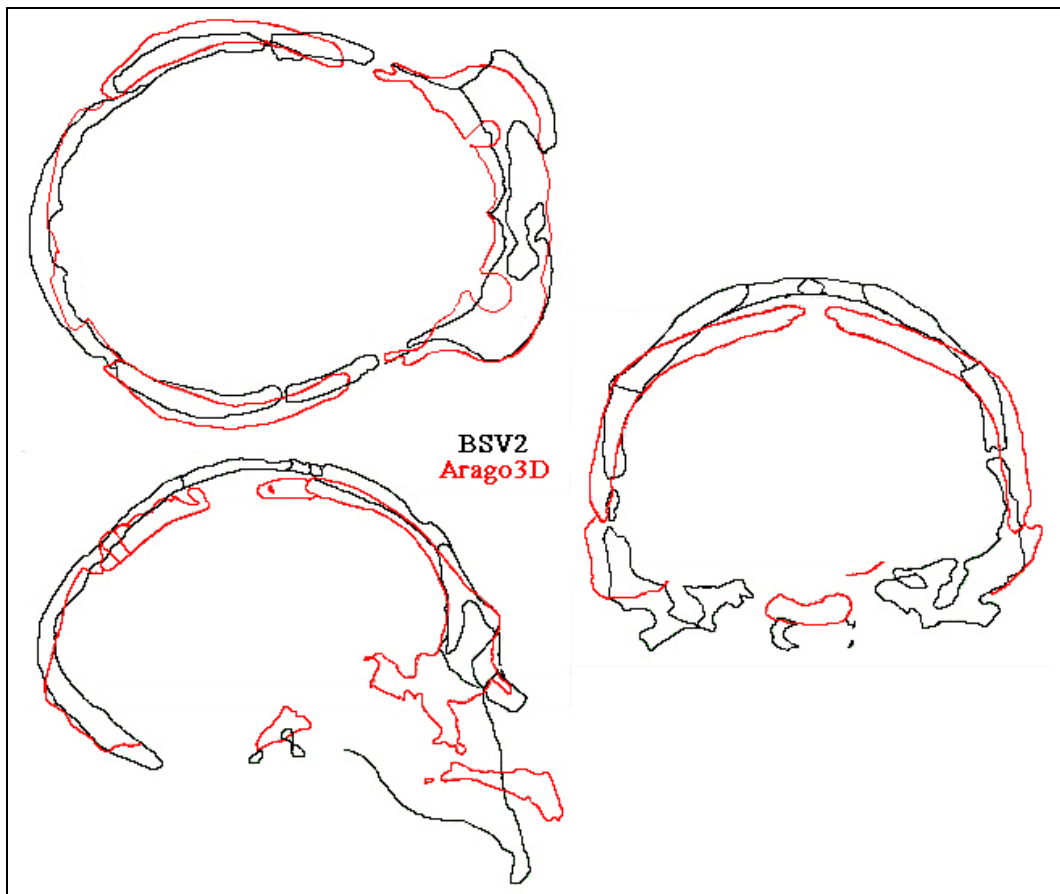


Figure 123 : Superposition des profils crâniens des chimères Arago3D et de Biache-Saint-Vaast 2 en vue supérieure, sagittale et frontale.

La comparaison des deux coupes frontales permet d'observer une écaille pariétale plus inclinée pour Arago3D par rapport à celle de BSV 2. L'angulation étant plus forte au niveau des lignes temporales, la voûte bipariétale d'Arago est moins courbée que celle de BSV 2, en étant plus pentagonale. Sagittalement, cette voûte est plus basse et moins courbée, Arago3D ne possédant pas de chignon occipital ni de dépression pré-lambdatique.

Biache-Saint-Vaast 2 présente des caractères communs avec chacun des spécimens comparés : largeur de la voûte bipariétale du type de celle d'Amud 1 et de Sima de los Huesos 5, une écaille frontale divergente comme celle de Tautavel, un torus frontal comme Krapina 3.

V.5.4 Définition des points de repères craniométriques utilisés pour modéliser BSV 2

Pour comparer notre proposition à d'autres Hominidés fossiles au moyen de superimpositions Procrustes, nous avons défini les points de repères craniométriques sur la reconstruction (figure 142). La définition des astérions, incisures pariétales, lambda, opisthocranion, bosses pariétales, nasion, glabellae, point supraglabellaire, fronto-malaires temporaux, fronto-temporaux, prosthion, jugaux et des porions n'a posé aucune difficulté.

Nous avons dû reconstruire les autres points de repères craniométriques à partir de la chimère BSV 2.

Le kryptophion peut être déterminé en estimant la portion manquante d'écaille squameuse. La limite supérieure de cette zone correspond à la fracture antéro-inférieure de l'écaille latérale du pariétal de BSV 2. Le kryptophion se situe au croisement de la limite antérieure de cette fracture, et du prolongement supérieur de la suture temporo-sphénoïde.

Le sphénion se situe dans le prolongement antérieur du bord supérieur de la grande aile du sphénoïde, quelques millimètres en arrière de la fosse temporale de l'os frontal.

Le stéphanion est positionné au croisement du prolongement de l'arête latérale du frontal et au prolongement vers le haut du bord postérieur gauche de l'écaille frontale.

En raison de la proximité entre les fragments de l'os frontal et du pariétal gauche, nous estimons que la zone intermédiaire correspond à la suture coronale et à ses bordures. Le stéphanion gauche sert alors à définir par symétrie le stéphanion droit. Nous avons procédé de la même manière pour le sphénion droit.

Le bregma a été défini en recoupant les données provenant de BSV 1 et de l'os frontal de BSV 2. Les extrémités antérieures des pariétaux symétrisés de BSV 1 correspondent au bregma de BSV 1. Ce point doit correspondre au bregma de BSV 2 en prolongeant vers le

haut en projection le tracé du bord postérieur gauche de l'écaille frontale. Une fois le bregma défini nous pouvons établir la position du métopion et du sagittum.

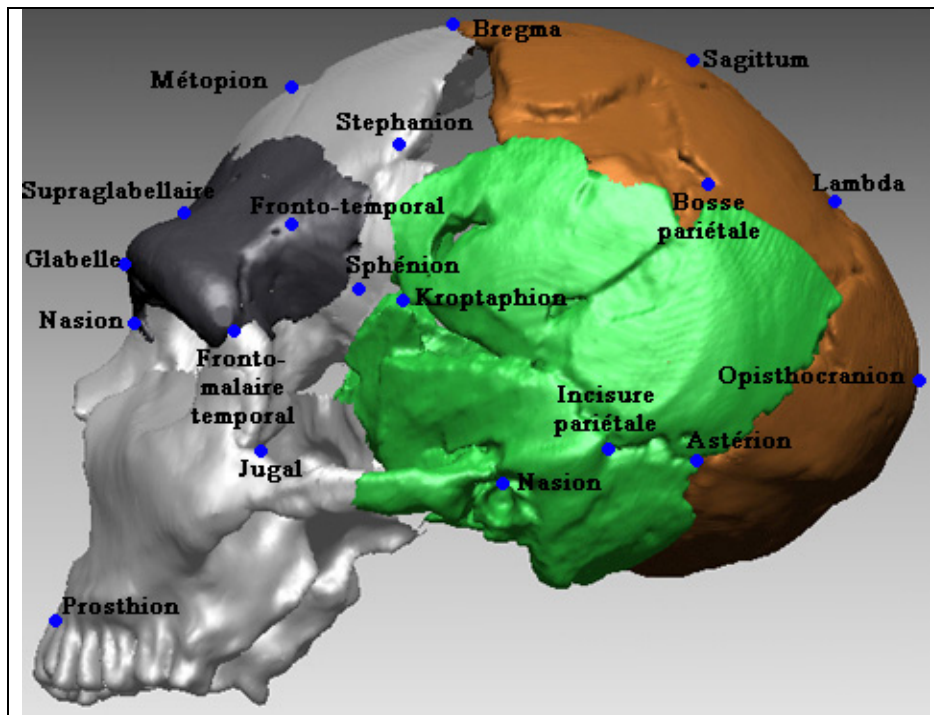


Figure 124 : Points de repères craniométriques définissant la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2.

Chap. VI. : Reconstruction Virtuelle Complémentaire : Dmanissi D2282*

En plus des crânes précédemment reconstitués ou restaurés, nous avons réalisé une reconstruction virtuelle, à partir de scanners des ossements originaux, d'un autre crâne déformé d'Hominidé fossile : D2282 (Dmanissi).

VI.1 Le crâne fossile D2282 de Dmanissi : reconstruction virtuelle D2282*

VI.2.1 Etat du fossile D2282

Le fossile D2282 découvert à Dmanissi, Géorgie, correspond au crâne (figure 125) d'une jeune adolescente (GABUNIA *et al.*, 2000, 2002).

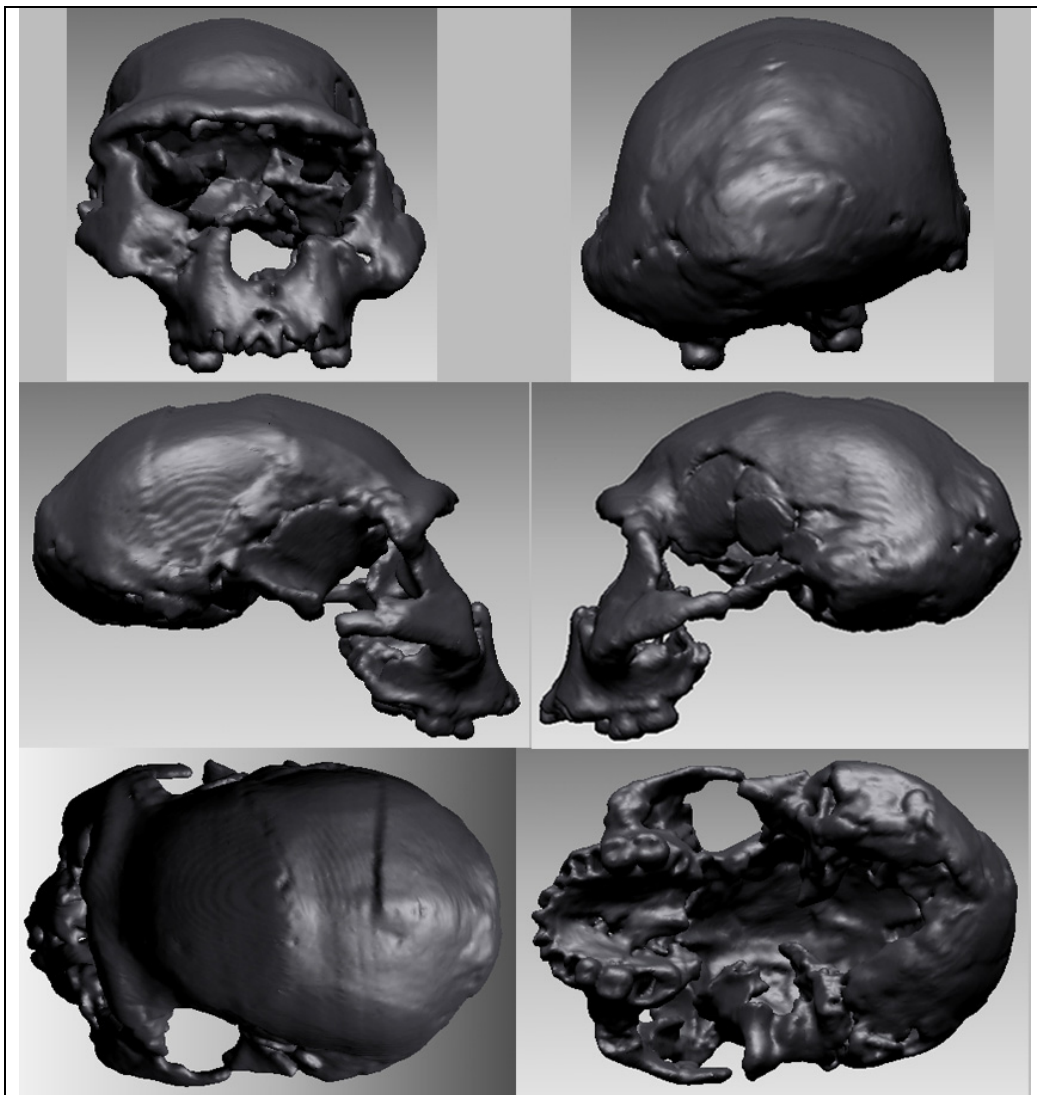


Figure 125: Modélisation tridimensionnelle du crâne Dmanissi D2282.

Le bourrelet frontal a été fracturé et est absent tout comme la portion inter-orbitaire. La voûte sagittale est basse au niveau de la voûte bipariétale. Ce crâne a subi des déformations, notamment au niveau des os temporaux droit et gauche, en positions très antérieures.

La déformation la plus importante est constatable sur le bord droit. La position très antérieure de l'os temporal droit nécessite une grande aile du sphénoïde extrêmement étroite, avec une forme aberrante. Nous mettons en évidence (figure 126) les différences d'orientation et de position de l'os temporal droit de D2280 (autre individu découvert à Dmanissi) avec D2282. La facette temporale de l'os frontal et le bord antéro-inférieur du pariétal gauche ont subi un enfoncement suite à une pression latérale. Nous constatons au niveau de l'os occipital un enfoncement du pourtour du foramen magnum ainsi qu'une différence de hauteur entre le planum nuchal gauche et le planum nuchal droit plus haut (vraisemblablement le résultat d'une pression déformante).

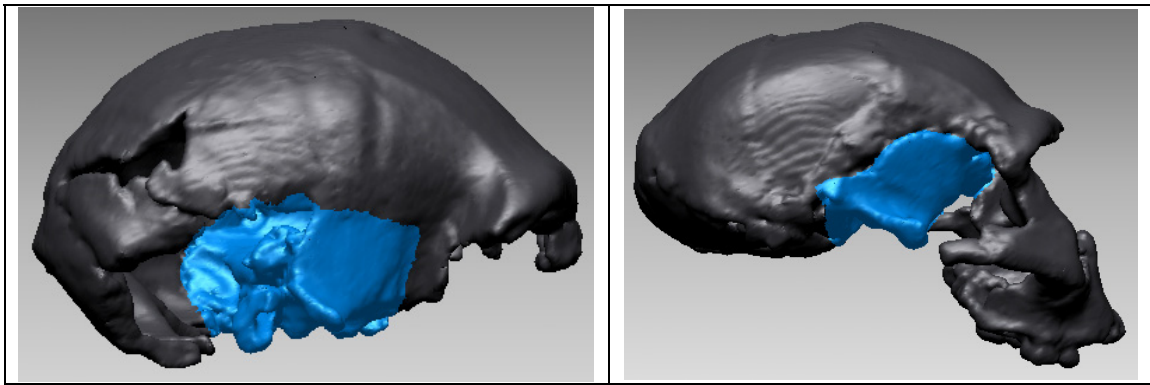


Figure 126 : Différences de positionnement des os temporaux droits des individus D2280 (gauche) et D2282 (droite).

L'antériorité excessive de l'os temporal droit de D2282 peut être mise en évidence en modélisant le segment biporionique en vue supérieure (figure 127). Nous constatons l'antériorité du porion droit par rapport au porion gauche.

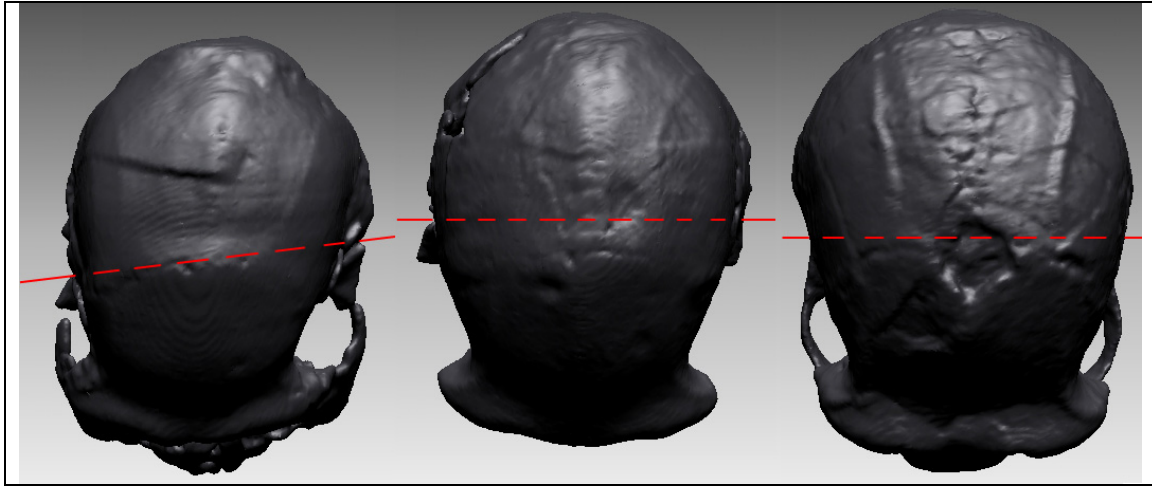


Figure 127 : Modélisation de l'axe biparietionique chez D2282 (gauche), D2280 (centre), KNM-ER 3733 (droite).

La déformation subie par le crâne n'est pas limitée à l'avancée de l'os temporal gauche. Les deux os temporaux ont subi aussi un mouvement de bascule vers l'intérieur dans le plan frontal avec un relèvement du rocher (figure 128). Ce phénomène est à mettre en parallèle avec l'enfoncement vers le haut du planum nuchal.

Dernière déformation constatable : le décalage latéral entre le bourrelet sus-orbitaire et le maxillaire (figure 128). Cette différence d'alignement est due au mouvement des os temporaux qui ont entraîné un décalage et une rotation des os malaïres droit et gauche. Ce déplacement a aussi eu des répercussions sur les sutures maxillo-malaïres. Nous ne pouvons commenter le type d'altération existant au niveau des sutures fronto-malaïres en nous fondant seulement sur les reconstructions tridimensionnelles.

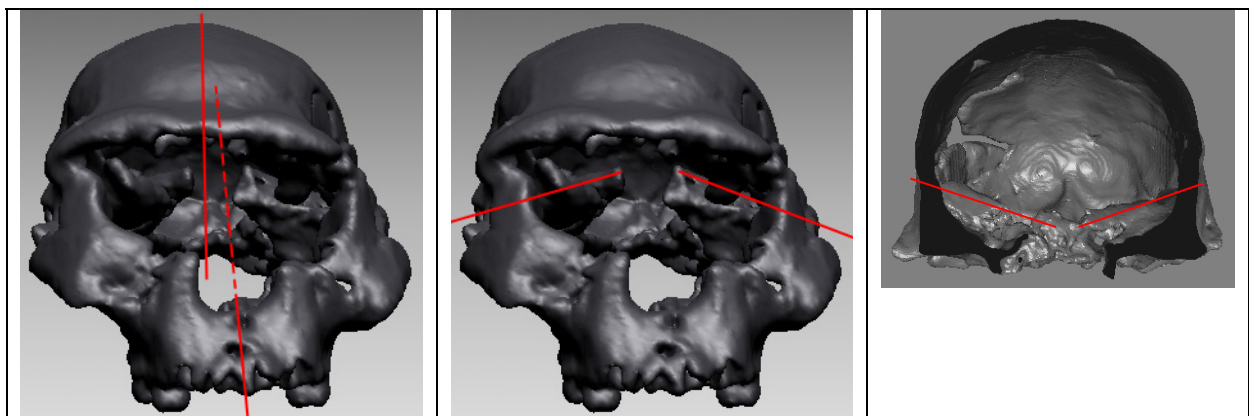


Figure 128 : Modélisation des axes sagittaux de la calotte crânienne et du maxillaire de D2282 (gauche) et modélisation de l'axe des rochers de D2282 (centre) et de D2280 (droite).

VI.2.2 Proposition de reconstitution virtuelle de D2282* - Méthode

N'ayant eu accès qu'aux données tomодensitométriques de D2282, nous ne proposons pas ici une version définitive, mais une proposition de reconstruction du crâne. Nous ne pourrions articuler définitivement les os temporaux et finaliser cette proposition qu'après avoir pu étudier le fossile original. Nous la distinguons de l'original en la désignant D2282*.

La première étape de l'opération de restauration a consisté à dissocier tous les os (figure 129) présentant diverses déformations : malaires (rotations et bascules latérales), maxillaire (compression des sutures avec les os malaires), temporaux (translation antérieure de l'os temporal droit, basculement interne des temporaux via une pression sous le crâne), facette temporale frontale gauche et bord antéro-inférieur du pariétal gauche (enfoncement latéral), pourtour du foramen magnum (enfoncement dû à une pression infra-crânienne).

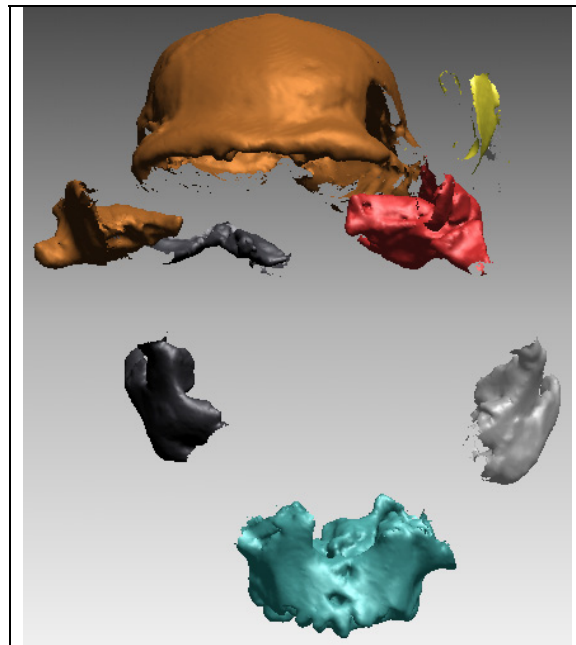


Figure 129 : D2282 après isolement virtuel des différents fragments crâniens, vue de face.

L'assemblage des fragments virtuels a commencé par l'articulation du fragment de la facette temporale frontale gauche en continuité avec le reste de l'écaille frontale. La courbure de la fracture permet de réaligner le fragment enfoncé dans la continuité de l'écaille (figure 130). Nous avons procédé de la même manière pour le fragment antéro-inférieur du pariétal gauche.

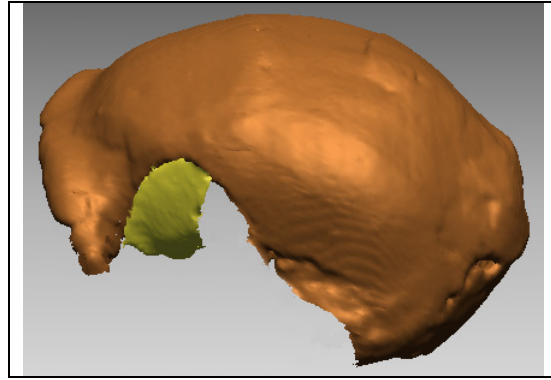


Figure 130 : Repositionnement virtuel de l'écaille frontale de D2282*.

Nous avons articulé le temporal gauche en abaissant la pointe du rocher, située beaucoup trop haut en vue frontale. Cet abaissement a été effectué en basculant la pièce en vue frontale et en la positionnant plus bas dans son ensemble. Ce mouvement a été limité par l'inclinaison de l'écaille temporale par rapport à l'écaille latérale du pariétal ainsi que par la zone de recouvrement du temporal sur le pariétal (suture pariéto-temporale). Nous avons ensuite intégré le malaire gauche pour articuler l'apophyse orbitaire avec le frontal et le processus temporalis avec l'apophyse zygomatique de l'os temporal (figure 131). Nous avons procédé de la même manière pour intégrer l'os temporal droit et l'os malaire correspondant. En raison d'une plus grande déformation, l'os temporal droit a dû être plus reculé que celui de gauche par rapport à sa position plus antérieure sur le fossile.

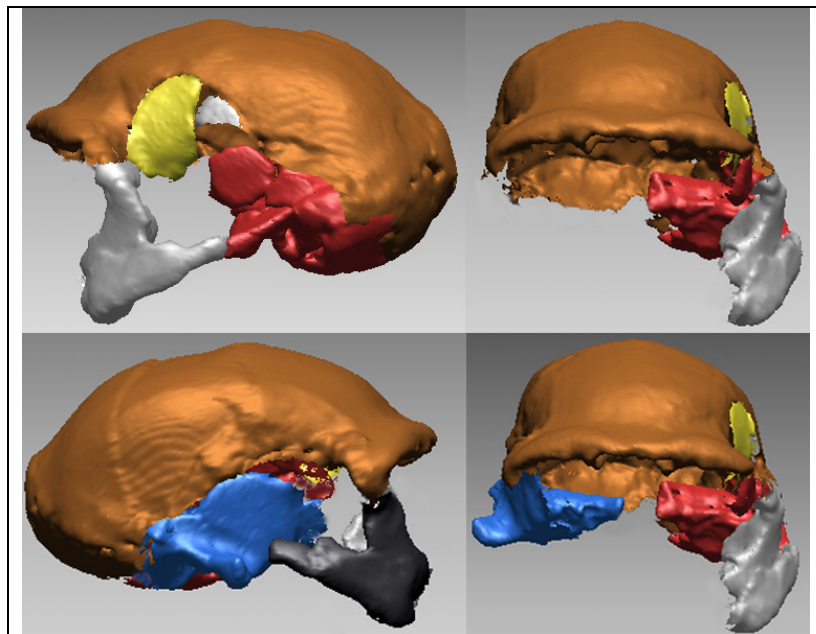


Figure 131: Intégration virtuelle de l'os temporal et de l'os malaire gauche sur la proposition de reconstruction de D2282* puis les os correspondant sur le bord droit.

Nous constatons sur la figure 131 que les rochers des deux os temporaux ne sont pas orientés de la même manière. Nous n'avons pas pu compenser totalement cette différence en raison du travail unique sur des images tomodensitométriques. Nous pourrions améliorer le découpage de l'os temporal gauche après examen plus approfondi de l'os original.

Nous avons utilisé les reconstructions tridimensionnelles d'autres Hominidés fossiles (KNM-ER 3733, KNM-WT 15000) pour comparaison lors du positionnement et de l'articulation des fragments temporaux, malaïres et maxillaires (figure 132). Ces crânes ne nous ont pas servis de supports virtuels.

Nous n'avons pas pu utiliser de crânes d'*Homo habilis*, les moulages auxquels nous avons accès ne présentant pas un état surfacique satisfaisant.

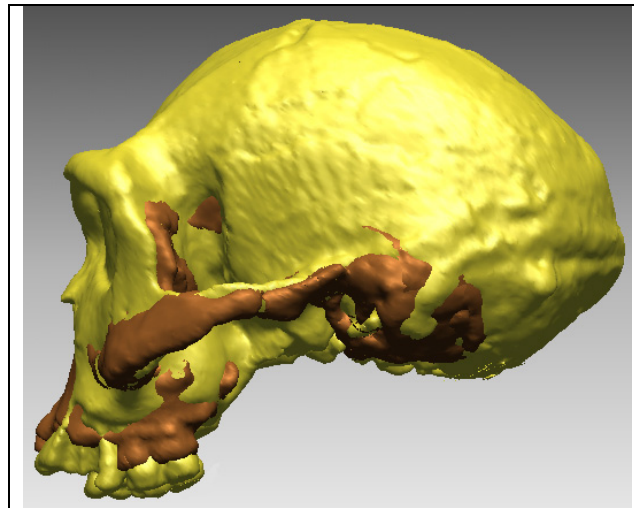


Figure 132 : Superposition virtuelle de notre proposition de D2282* et du crâne de KNM-ER 3733 suivant le plan de Francfort.

Nous avons ensuite procédé à l'intégration virtuelle du maxillaire entre les deux os malaïres repositionnés (figure 133). Le positionnement n'a pas nécessité de modifier et de replacer les os malaïres. Dans une dernière étape nous avons positionné inférieurement la portion d'occipital entourant le foramen magnum, qui avait été surélevée par une poussée infra-crânienne.

Les points de repères craniométriques ont été coordonnés tridimensionnellement afin d'intégrer notre proposition D2282* dans les comparaisons Procustes.

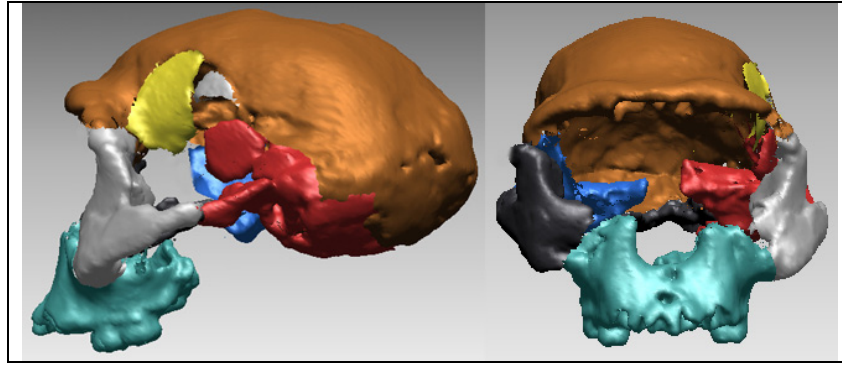


Figure 133 : Proposition de reconstruction pour D2282* après insertion du maxillaire.

VI.2 Résultats de la reconstitution virtuelle de D2282*

En raison du découpage puis de la nouvelle articulation de l'os temporal droit avec le reste du crâne D2282*, le segment inter-porions est perpendiculaire au plan sagittal (figure 134) alors qu'il est oblique sur le crâne original suivant un axe antéro-droit postéro-gauche. En projection transversale, ce segment est postérieur au bregma, comme cela est le cas pour Dmanissi D2280 et l'*Homo ergaster* KNM-ER 3733.

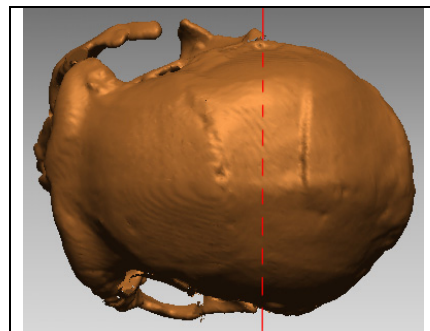


Figure 134 : Modélisation de l'axe biporionique sur notre proposition de reconstruction virtuelle du crâne D2282*.

Le prognathisme maxillaire est moindre sur notre proposition que sur l'original, en raison d'un prosthion moins antérieur sur D2282*. Notre proposition de reconstruction présente une position similaire du maxillaire par rapport au troisième fossile de Dmanissi, D2700 (figure 135 ; VEKUA *et al.*, 2002), plus en retrait que sur l'original D2282 (figure 136). Nous n'avons pas modifié le décalage de l'axe transversal (antéro-droit postéro-gauche) du bourrelet frontal par rapport au plan sagittal, car il semble plus relever d'une asymétrie naturelle que d'une déformation post-mortem comme pour les autres déformations constatées. Le maxillaire et le bourrelet sus-orbitaire sont dans le même plan sagittal médian (figure 136).

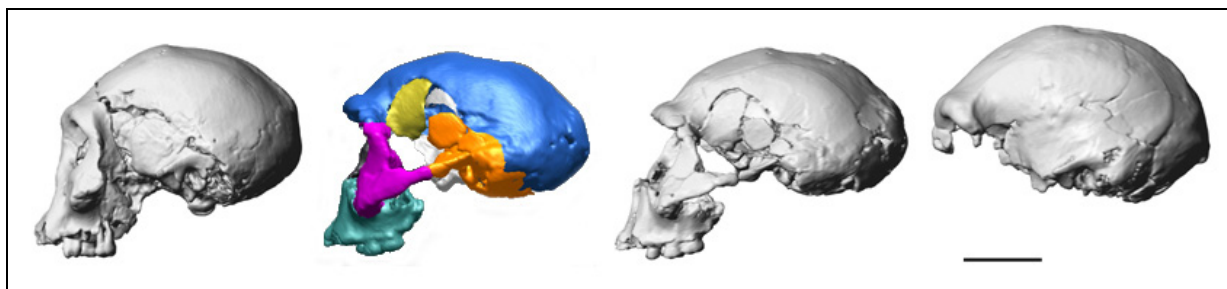


Figure 135 : Vue de profil gauche de D2700 – D2282 – D2280 de Vékua *et al.* (2002) avec inclusion de notre proposition de reconstruction D2282* (couleur).

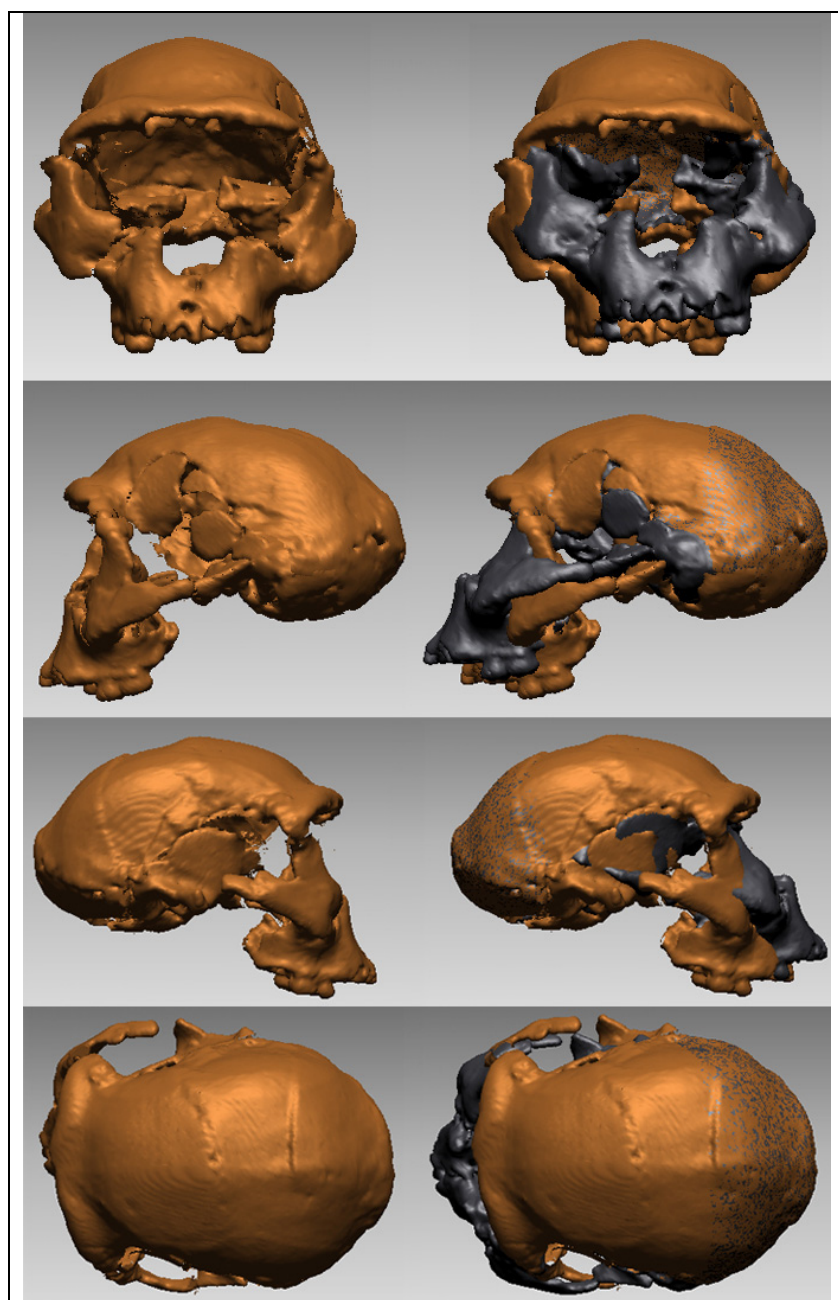


Figure 136 : Proposition de reconstruction virtuelle de D2282* (gauche) et superposition de notre proposition et de l'original (droite ; original en noir).

Nous avons superposé virtuellement la modélisation du moulage du crâne de KNM-WT 15000 avec notre proposition en nous fondant sur le bourrelet sus-orbitaire ainsi que sur l'apophyse zygomatique droite. Nous pouvons constater (figure 137) que notre proposition a un prognathisme alvéolaire moins marqué que celui de l'adolescent de Nariokotome. Autre différence, la voûte sagittale de D2282* est beaucoup plus basse que celle de KNM-WT 15000 pour une longueur maximale du crâne presque identique. KNM-WT 15000 présente une largeur maximale supérieure au niveau du torus angularis.

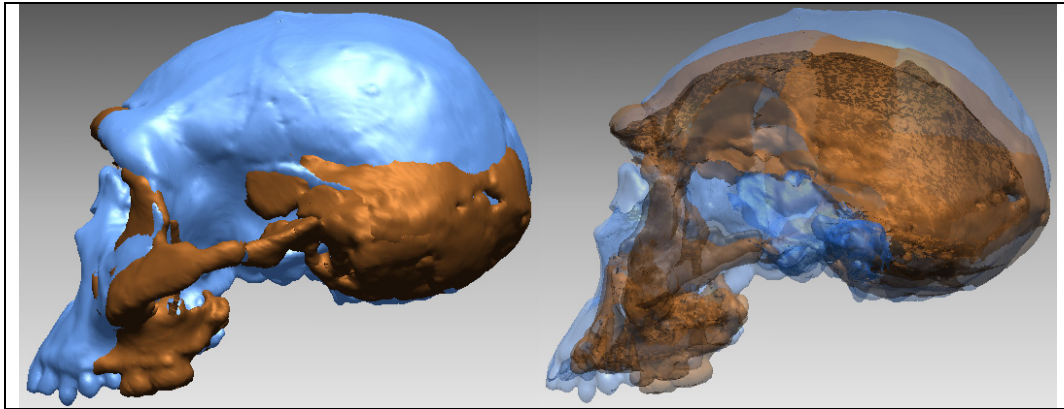


Figure 137 : Superposition virtuelle du crâne de KNM-WT 15000 et de notre proposition de reconstruction de D2282*, en plein et en transparence.

Certaines des différences morphologiques (prognathisme) pourraient résulter de notre reconstruction ainsi que de la reconstruction de KNM-WT 15000. Une comparaison suivant le plan de Francfort de notre proposition de reconstruction virtuelle de D2282* avec les spécimens d'*Homo ergaster* KNM-WT 15000 et KNM-ER 3733 (figures 137 et 138) permet de mettre en évidence une voûte crânienne sagittale assez basse sur D2282*.

Le crâne de D2282* est moins long que celui de KNM-ER 3733. Le prognathisme maxillaire est comparable. La voûte sagittale de l'autre individu découvert à Dmanissi, D2280, est plus haute que celle de D2282* et est semblable à celle de KNM-ER 3773 en longueur et en hauteur.

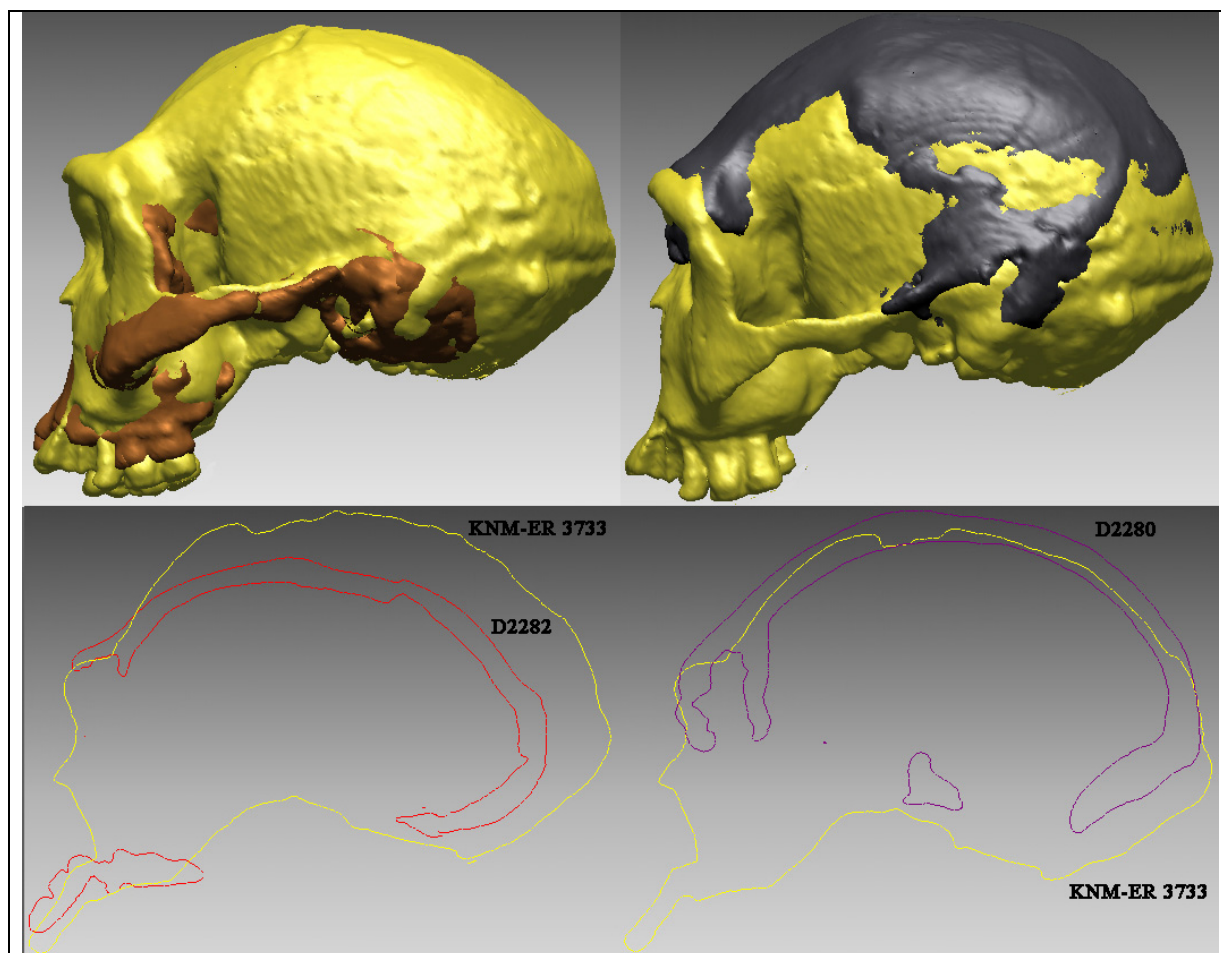


Figure 138 : Superpositions virtuelles du crâne de KNM-ER 3733 avec celui de D2282* et avec la calotte crânienne de D2280 en vue latérale.

Nous présentons en figure 139 les déformations subies par le fossile D2282.

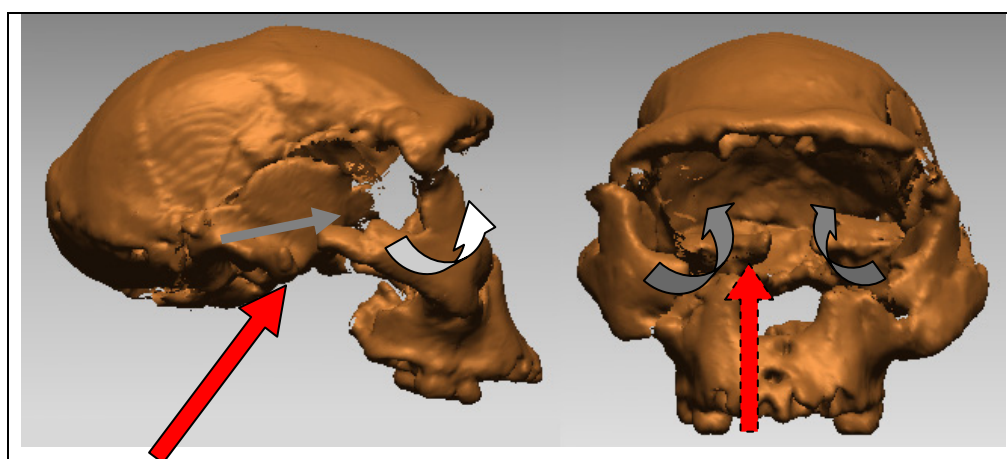


Figure 139 : Axe principal des pressions exercées sur le crâne de Dmanissi D2282* (flèche rouge) et mouvements des os temporaux (blanc) et malaies (gris).

Le fossile a subi une pression infra-crânienne s'exerçant préférentiellement sur la droite du crâne suivant un axe oblique postéro-anérieur et entraînant l'avancée du temporal gauche et droit (coté subissant la plus grande pression). Suite à ce mouvement, les os malaires droit et gauche ont été poussés latéralement et pivotent par rapport au maxillaire et à l'os frontal. Les jonctions fronto-malaires subissent une compression verticale et glissent transversalement. L'écaille frontale gauche a subi un enfoncement tout comme la portion antéro-inférieure du pariétal gauche.

Cette nouvelle articulation des os déformés de D2282* déformés a entraîné la modification de certaines valeurs morphométriques telles que la largeur bijugale de la face (élargissement), la hauteur de la face (étirement), et la largeur bisphénique (élargissement). Nous regroupons les valeurs modifiées dans le tableau 21 suivant.

Tableau 21 : Valeurs morphométriques de notre reconstruction D2282* différant de l'original.

	Reconstruction tridimensionnelle de l'original	Proposition de reconstruction 3D
Largeur bijugale	115,3 mm	121,6 mm
Largeur bisphénique	94 mm	95 mm
Corde bregma - prosthion	160,5 mm	163 mm

Chap. VII : Résultats des Superimpositions Procrustes

Avant de procéder à une analyse spécifique des populations au moyen de projections, nous présentons une vision générale des individus étudiés. Nous limitons cette présentation à la modélisation des crânes en 24 points (figure 140). La superimposition Procruste permettant d'étudier les individus sans tenir compte de la taille, nous comparons les conformations tridimensionnelles.

L'axe 1 représente 64,7% de la variance totale des individus analysés contre 5,8% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent près de la 70% de la variance totale. Nous avons relevé les valeurs des dix premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales (graphique 2).

Nous obtenons le long de l'axe 1 trois grands groupes.

Les Gorilles, Chimpanzés et Paranthropes, se situent aux valeurs négatives extrêmes de l'axe 1. Ces spécimens se distinguent le long de l'axe 2 (notamment les Chimpanzés et les Paranthropes). La conformation tridimensionnelle faciale est large au niveau jugal, avec une calotte crânienne étroite. La constriction post-orbitaire est très forte (largeur frontale minimale presque égale à la moitié de la largeur maximale des cavités orbitaires). Le prognathisme maxillaire représente plus d'un tiers de la corde prosthion – opisthocranion.

Les *Homo sapiens* historiques et les plus récents des spécimens préhistoriques se situent à l'extrémité positive de l'axe 1. La conformation crânienne est différente (prognathisme maxillaire faible à inexistant, absence de constriction post-orbitaire, forte largeur de la voûte bipariétale).

Les *Australopithecus africanus*, et toutes les autres espèces du genre *Homo*, se situent entre les extrémités de l'axe 1, dissociés des Grands Singes et des Paranthropes, et plus ou moins dissociés des *Homo sapiens*.

En raison de la différenciation nette des conformations extrêmes et moindre des spécimens intermédiaires, nous présentons trois groupes d'analyses Procrustes : 1/ Les Grands Singes, Paranthropes, Australopithèques, et les premiers *Homo* ; 2/ Le genre *Homo* et les Australopithèques ; 3/ Le genre *Homo* exclusif sans les premiers *Homo* ni les *Homo sapiens* historiques.

Les *Homo sapiens* historiques constituent une population Normale (Annexe 3) et sont utilisés comme référence pour les différentes ACP.

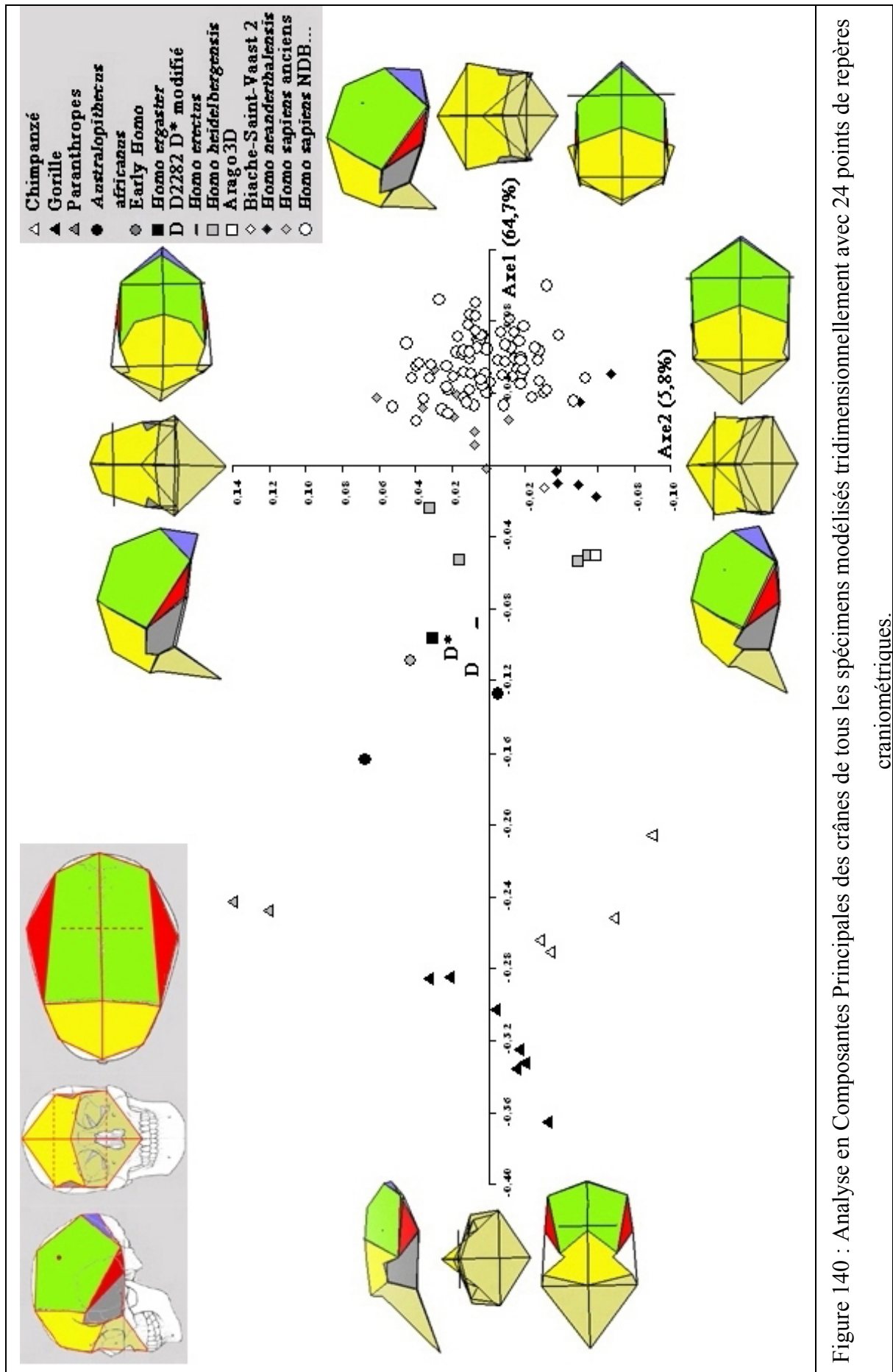
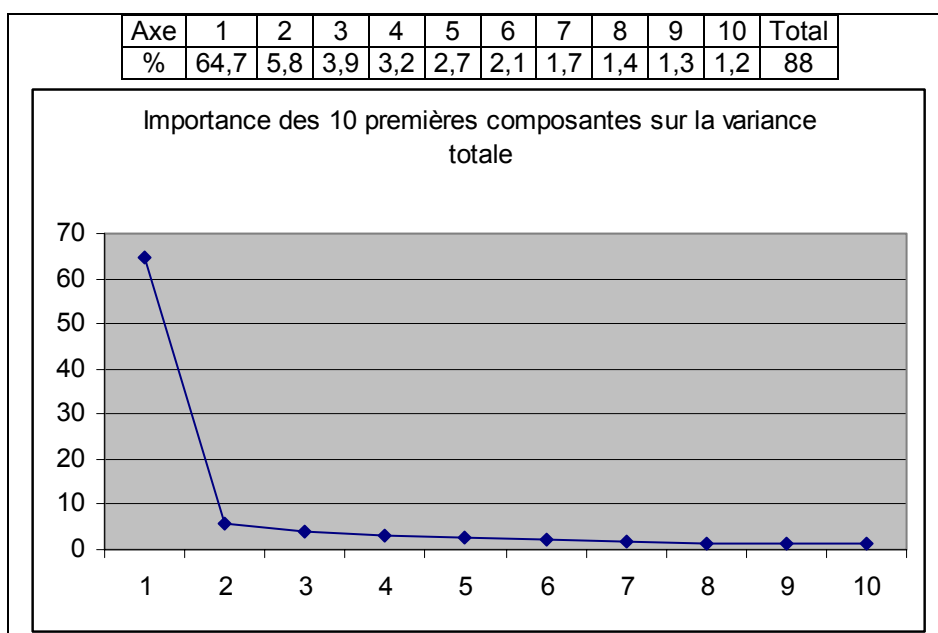


Figure 140 : Analyse en Composantes Principales des crânes de tous les spécimens modélisés tridimensionnellement avec 24 points de repères craniométriques.



Graphique 2 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle du crâne de tous les spécimens étudiés, avec 24 points de repères craniométriques.

VII.1 Variations tridimensionnelles des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*

VII.1.1 Modélisation tridimensionnelle des crânes des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers *Homo* avec 24 points de repères craniométriques

L'axe 1 (figure 141) explique 40,6% de la variance totale des individus étudiés contre 20,8% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent 61,4% de la variance totale. Nous présentons dans le graphique 3 les valeurs relevées des dix premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales. Les espèces étudiées se répartissent aux extrémités des deux axes de l'ACP. Les Gorilles sont dispersés le long de l'axe 1 entre les valeurs -0,14 et -0,02, avec une faible variabilité suivant l'axe 2 (0,04). Ces individus présentent une face presque aussi importante que le neurocrâne.

A l'opposé sur l'axe 1 (+0,12 à +0,16), les deux *Australopithecus africanus* et KNM-ER 1470 présentent la face la moins prognathe des individus comparés. La constriction post-orbitaire est fortement réduite (largeur minimale de l'écaille frontale correspondant aux trois quarts de la largeur maximale du torus frontal). KNM-ER 1470 a une position intermédiaire entre Sts 71 et Sts 70 (calotte crânienne moins large et largeur bijugale plus importante)

suivant l'axe 2. Les Chimpanzés se répartissent de part et d'autre de la valeur 0 sur l'axe 1 et s'étirent entre +0,035 (calotte crânienne moins large et largeur bijugale plus importante) et +0,12.

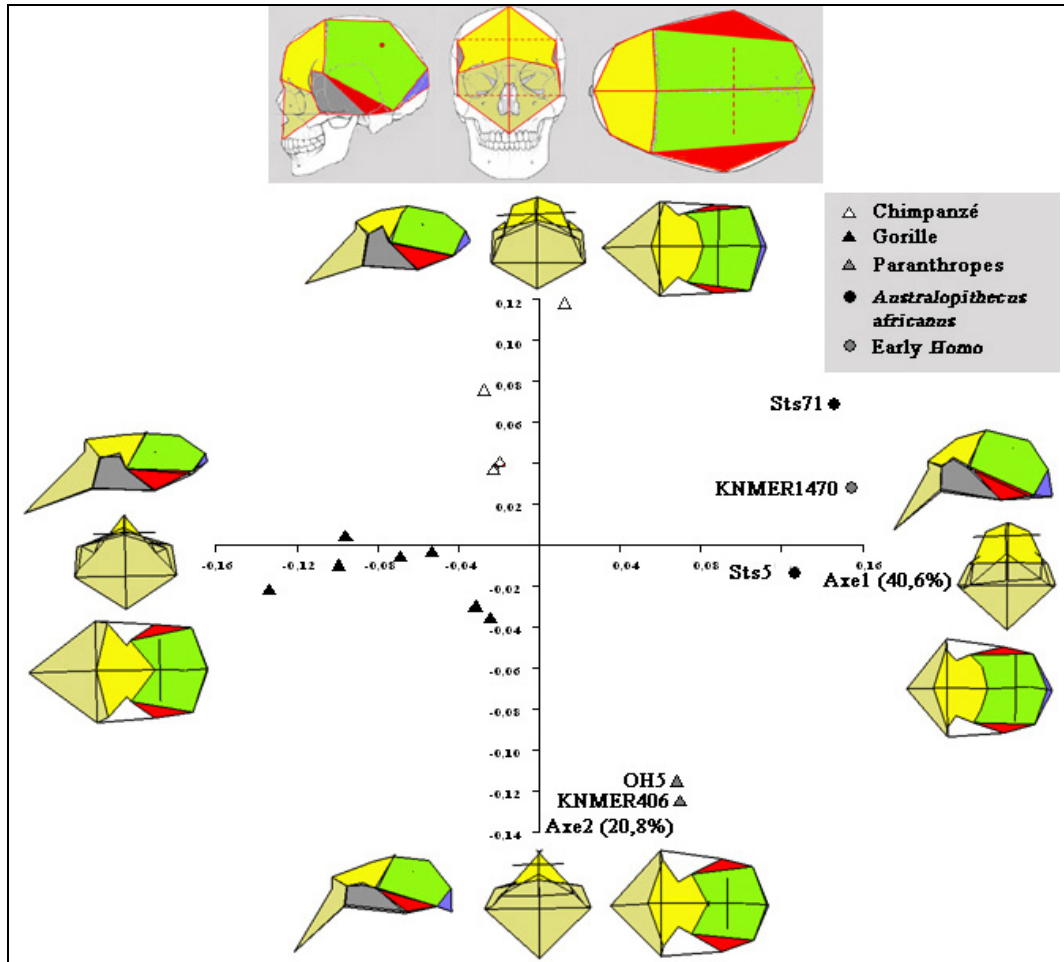
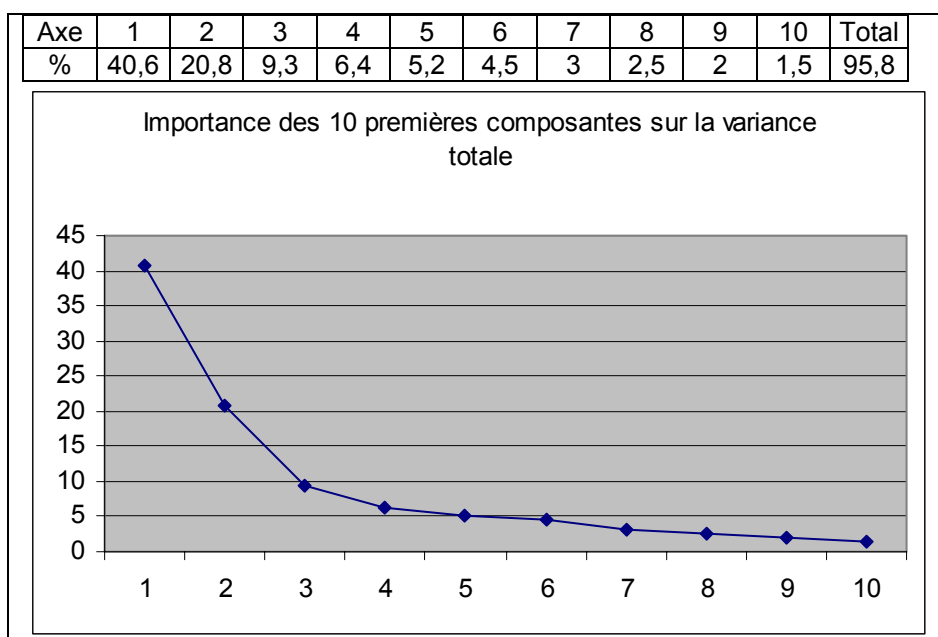


Figure 141 : Analyse en Composantes Principales des crânes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*. Modélisation tridimensionnelle avec 24 points de repères.

Les deux Paranthropes sont situés à l'opposée sur l'axe 2 (+0,07 ; -0,12). Ils présentent une forte constriction post-orbitaire, une avancée du maxillaire par rapport au neurocrâne et une calotte crânienne évasée vers le bas (largeur biporionique largement supérieure à celle de la largeur maximale de la voûte bipariétale).



Graphique 3 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle des crânes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo* avec 24 points de repères craniométriques.

VII.1.2 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers *Homo* avec 21 et 19 points de repères craniométriques

Les résultats de la modélisation de la calotte crânienne avec 21 points et 19 points de repères craniométriques étant identiques, nous ne présentons ici que les résultats de la modélisation avec 19 points.

L'axe 1 (figure 142) explique 38% de la variance totale des individus étudiés. L'axe 2 représente 23,5% de cette variance totale (61,5% pour les deux axes). Les valeurs des dix premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales sont présentées dans le graphique 4.

La répartition des différentes reconstructions tridimensionnelles correspond à celle observée pour la comparaison des crânes en 24 points. Les valeurs des axes sont différentes. La réduction de l'importance du premier axe est liée à l'accroissement du nombre d'individus.

Le passage sur l'axe 1 des valeurs minimales (Gorille) aux valeurs maximales (premiers *Homo*) correspond à un bombement de la voûte sagittale (bregma et sagittum plus hauts et plus avancés). Le métopion est plus antérieur par rapport au segment bregma – glabellle (écaille frontale plus verticale). Cette poussée sagittale s'accompagne d'un

élargissement supérieur de la voûte bipariétale : accroissement des largeurs frontale minimale, bistéphanique, bisphénique et de la largeur entre l'équivalent des bosses pariétale plus hautes, plus postérieures. En parallèle les largeurs biastérique et entre les points fronto-malaires temporaux décroissent.

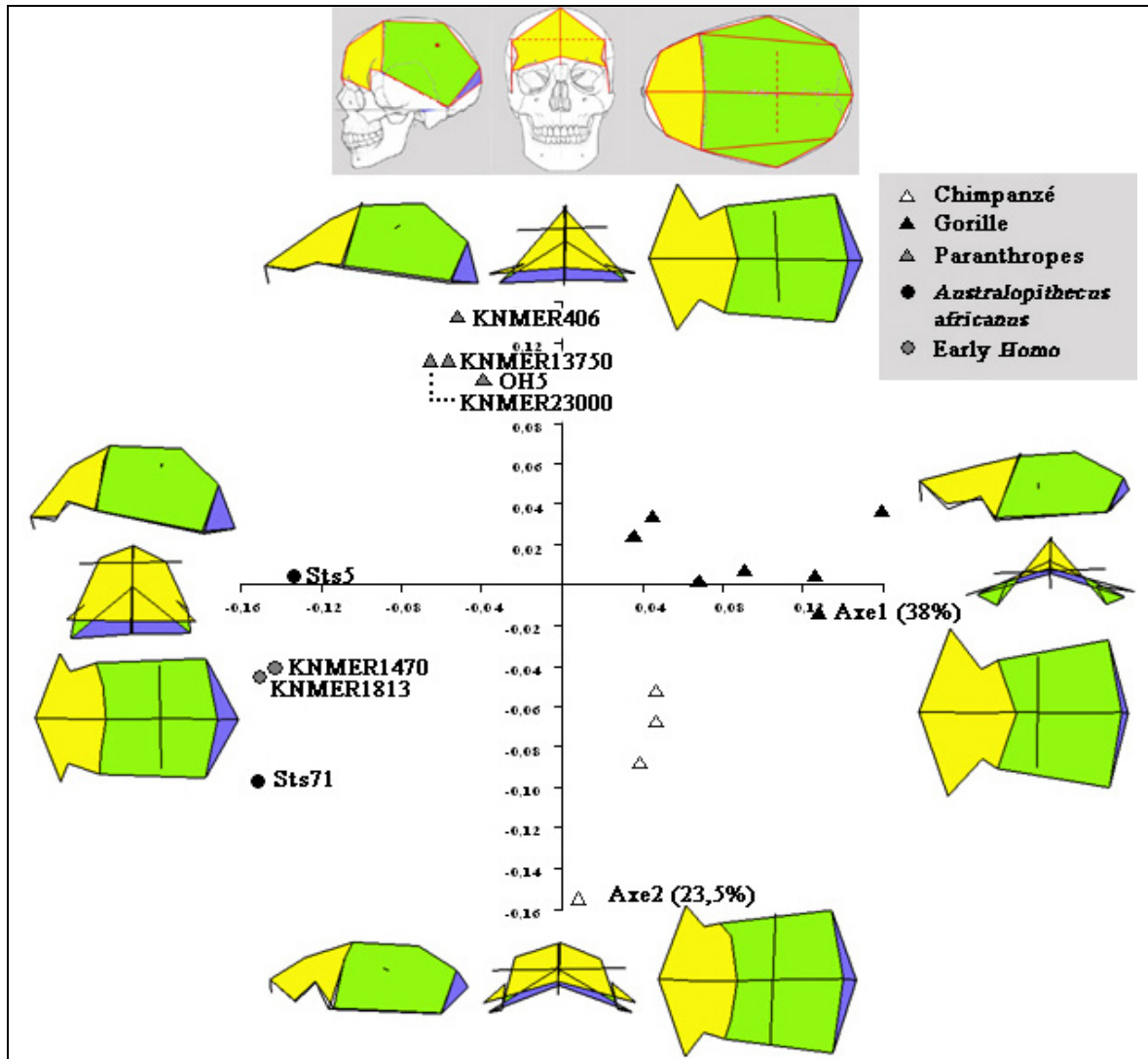
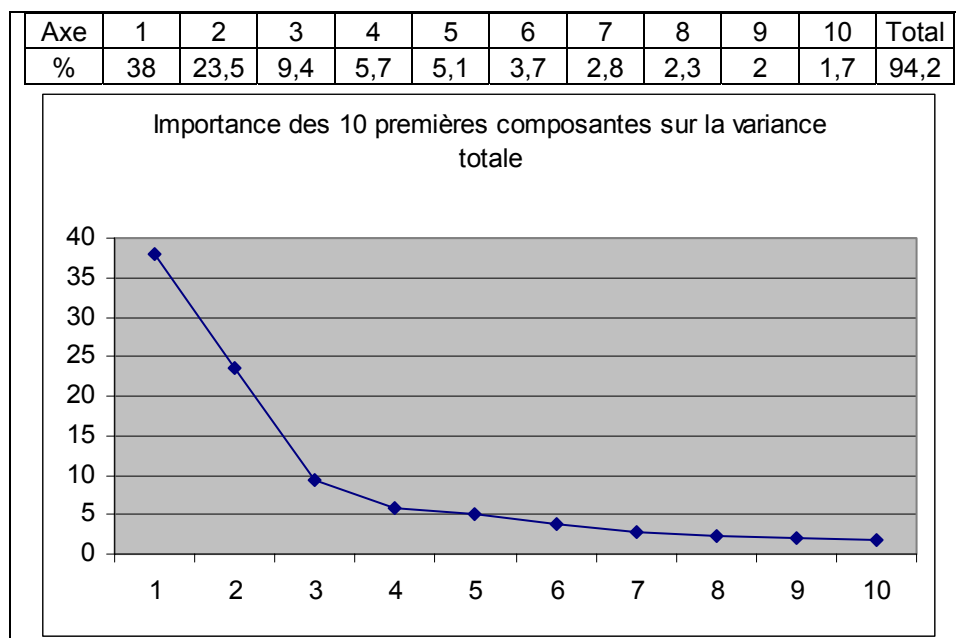


Figure 142 : Analyse en Composantes Principales des calottes crâniennes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*. Modélisation tridimensionnelle avec 19 points de repères craniométriques.

Le passage des valeurs minimales (Chimpanzés) aux valeurs maximales (Paranthropes) suivant l'axe 2 correspond à une diminution de la largeur bistéphanique (ce qui donne une écaille frontale triangulaire pour les Paranthropes), de la largeur frontale minimale (plus forte constriction post-orbitaire) et biastérique.

La population des Paranthropes est très homogène suivant l'axe 1 et l'axe 2, mais moins que KNM-ER 1470 et KNM-ER 1813. L'écart entre Sts 5 et Sts 71 est toujours marqué le long de l'axe 2.



Graphique 4 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle des calottes crâniennes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo* avec 19 points craniométriques.

VII.1.3 Modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers *Homo*

L'axe 1 (figure 143) représente 37,8% de la variance totale des spécimens étudiés contre 18,1% pour l'axe 2, soit 56,9% de la variance totale pour ces deux composantes. Nous présentons dans le graphique 5 les valeurs relevées pour les dix premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales.

La répartition des individus sur l'ACP est semblable à celles des précédentes analyses. Certaines populations sont plus dissociées (Paranthropes et KNM-WT 17000, Chimpanzés).

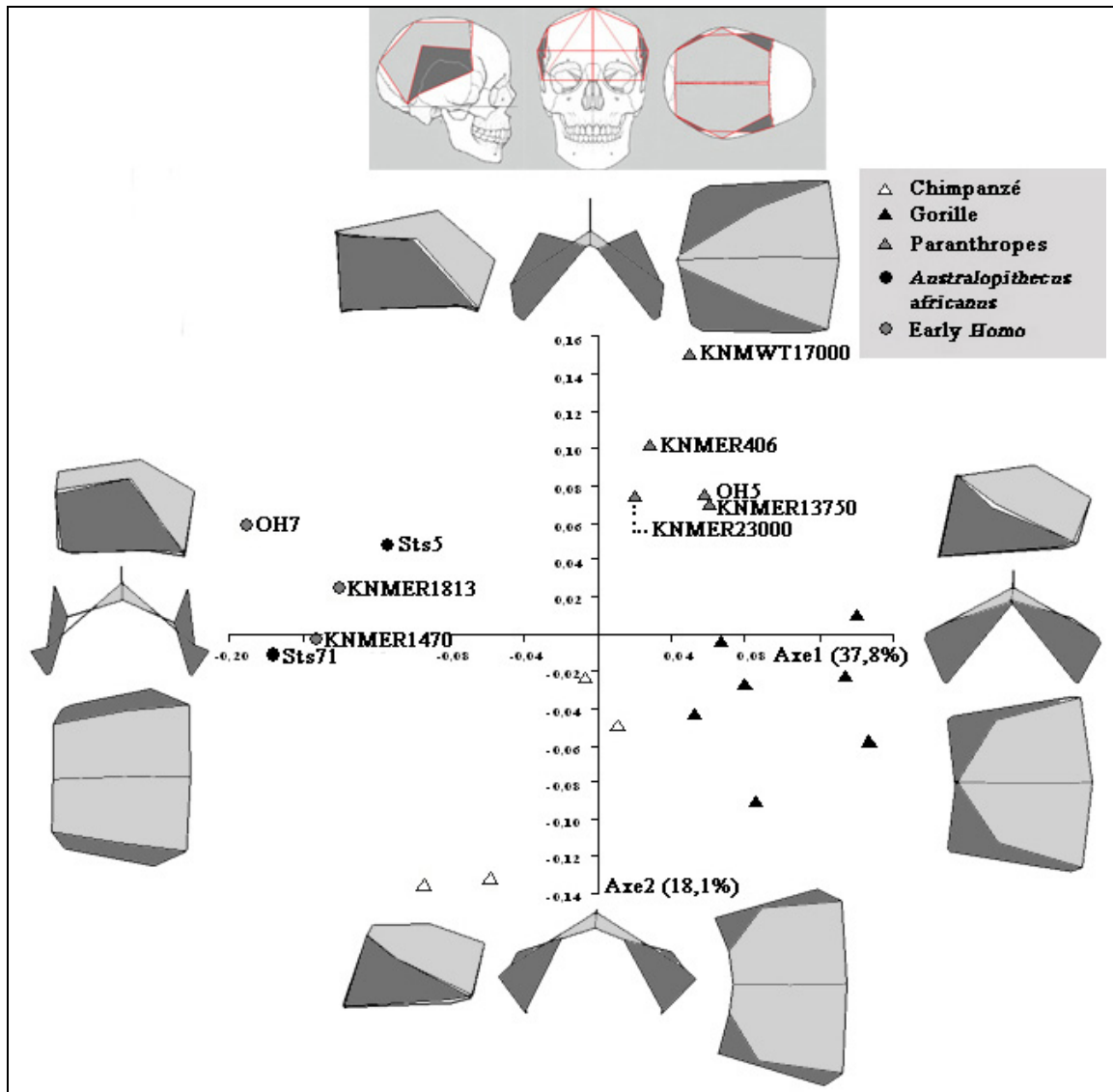
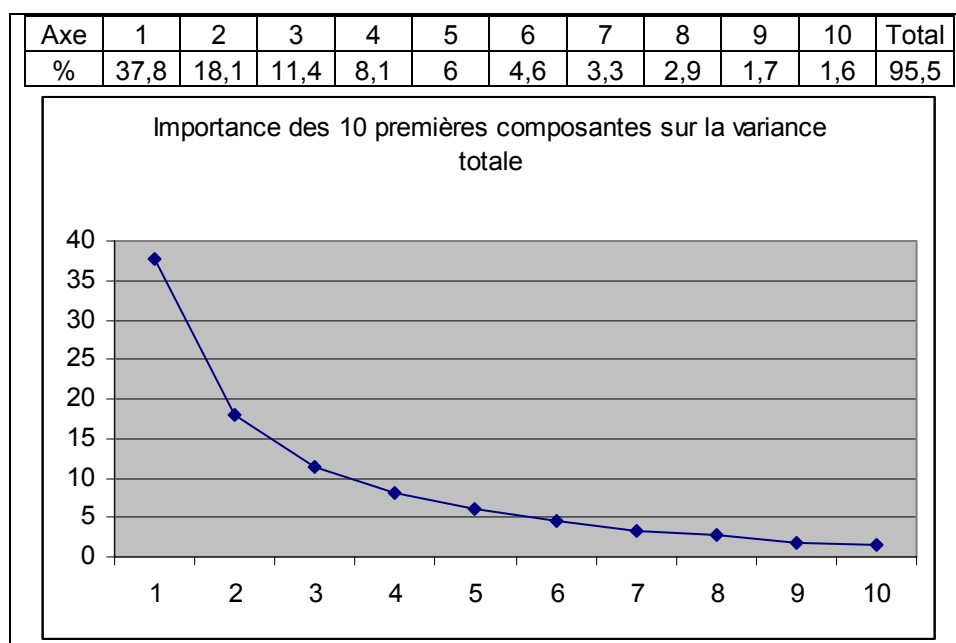


Figure 143 : Analyse en Composantes Principales de la voûte bipariétale des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*. Modélisation tridimensionnelle avec 15 points de repères craniométriques.

Le passage de la valeur maximale de l'axe 1 (Gorilles) à sa valeur minimale (premiers *Homo*) correspond à un élargissement de la voûte bipariétale avec des sphénions plus postérieurs et plus bas par rapport au bregma. Les stéphanions s'écartent du plan sagittal le long de l'axe 1 en allant vers les valeurs négatives, faisant passer l'ouverture coronale modélisée d'une forme triangulaire (Gorilles) à pentagonale (premiers *Homo*). Le lambda devient plus antérieur et est positionné plus haut par rapport aux astérions qui se rapprochent du plan sagittal transversalement (ce qui contribue à réduire l'angle astérion – lambda – astérion). Les incisures pariétales sont plus antérieures et plus basses. Les bosses pariétales sont positionnées plus postérieurement en allant vers les valeurs négatives de l'axe 1.

Le passage des valeurs négatives (Chimpanzés) de l'axe 2 aux valeurs positives (Paranthropes) correspond, en vue supérieure, au passage d'une forme tridimensionnelle en biseau à rectangulaire. Ceci est dû aux astérions et aux incisures pariétales (plus antérieures aussi) plus internes par rapport au kryptaphion. Les bosses pariétales sont de plus en plus proches du plan sagittal. Les stéphanions subissent le même mouvement (et sont plus antérieurs par rapport au sphénion), donnant à la partie supérieure de la voûte bipariétale une forme triangulaire. Le bregma est plus antérieur.



Graphique 5 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*.

VII.1.4 Modélisation tridimensionnelle du pariétal droit des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers *Homo*

L'axe 1 (figure 144) explique 37,8% de la variance totale contre 17,7% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent 55,5% de la variance totale. Les valeurs des dix premiers axes relevés pour l'Analyse en Composantes Principales sont présentées dans le graphique 6.

Le passage de la valeur minimale de l'axe 1 (Gorilles) à sa valeur maximale (premiers *Homo*) nécessite un relèvement des bosses pariétales (plus hautes et plus postérieures). Le lambda est plus haut par rapport à l'astérion et plus postérieur que celui-ci. L'astérion se situe à la même hauteur que le sphénion. Le stéphanion est plus à l'extérieur et plus bas par rapport au segment bregma – sphénion.

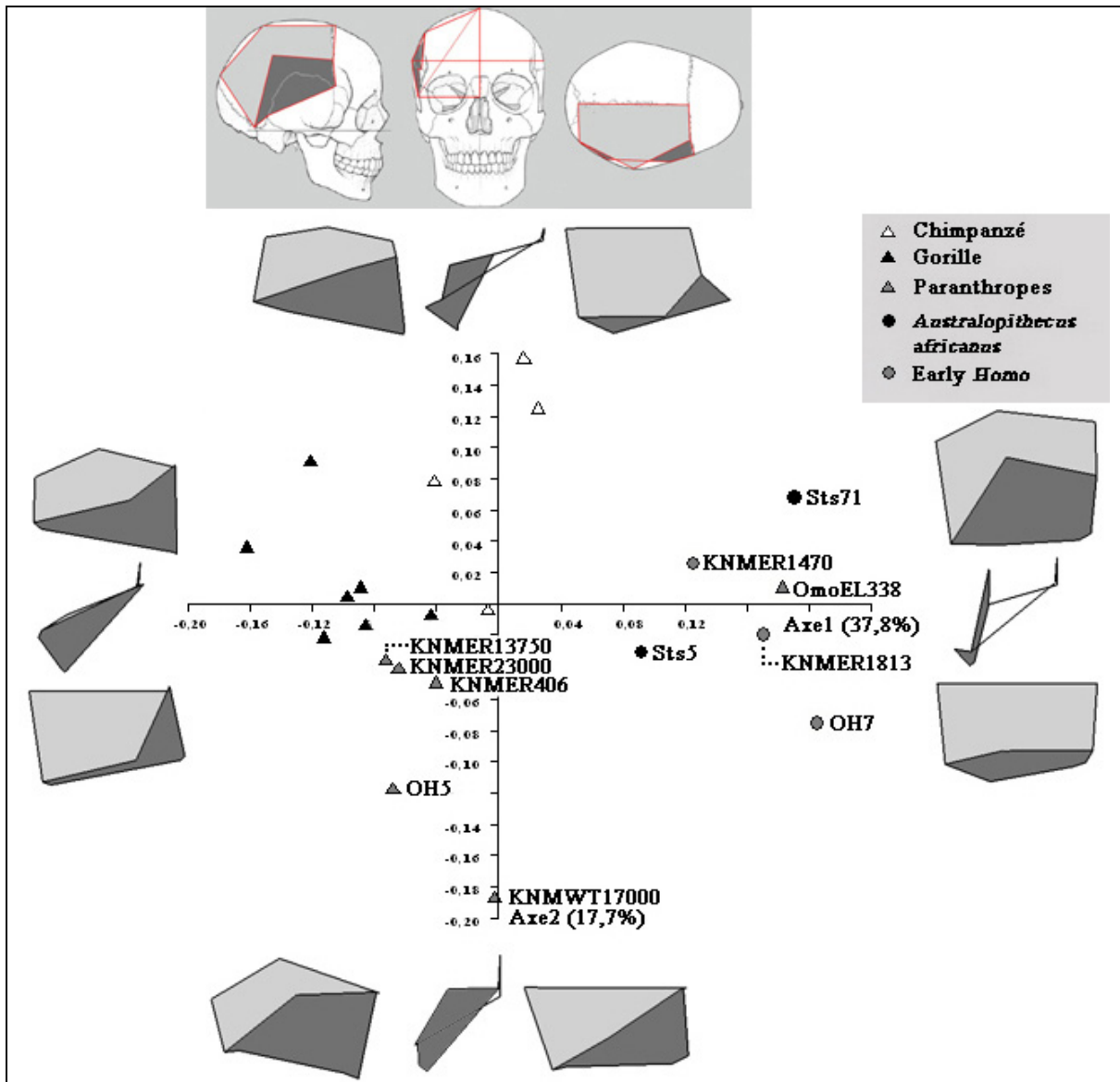
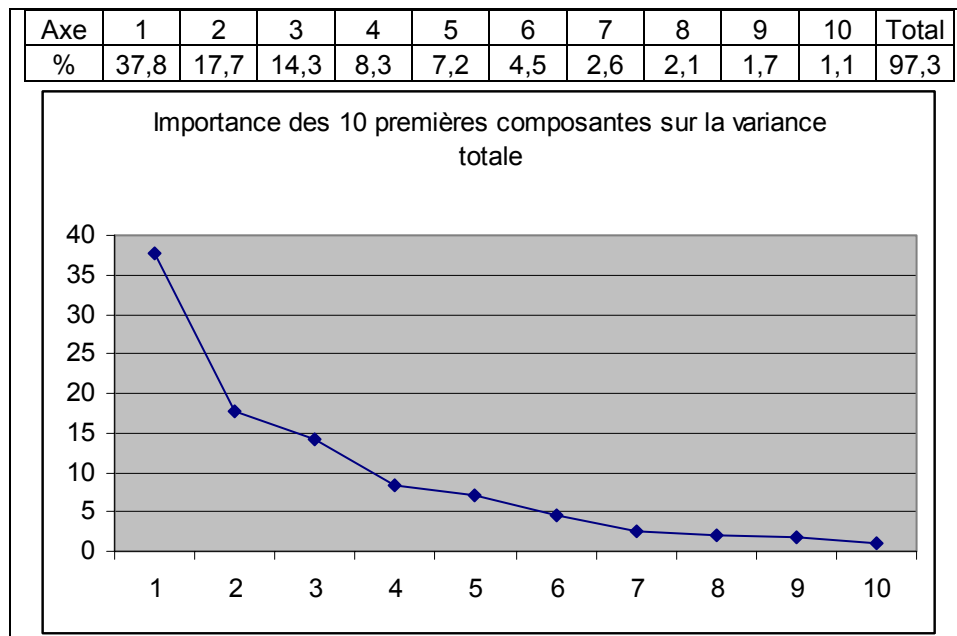


Figure 144 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle du pariétal droit des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*.

Le passage de la valeur minimale de l'axe 2 (KNM-WT 17000) à sa valeur maximale (Chimpanzés) correspond à un abaissement de l'incisure pariétale par rapport à l'astérion. Le sphénion passe d'une position postérieure à antérieure par rapport au bregma. Le lambda est plus antérieur par rapport à l'astérion. L'équivalent de la bosse pariétale est plus externe (la partie supérieure de l'écaille pariétale n'est plus triangulaire). En vue latérale le segment bregma – lambda est plus court que le segment astérion – sphénion chez les Chimpanzés alors que le rapport est inverse chez KNM-WT 17000.

La discrimination entre les différentes espèces (Gorilles, Chimpanzés, *Paranthropus boisei*) est difficile à réaliser au niveau des coordonnées origines (0 ; 0) du graphe. Au sein des Paranthropes nous distinguons quatre groupes : 1/ KNM-ER 13750, KNM-ER 23000, KNM-ER 406 ; 2/ OH5 ; 3/ KNM-WT 17000 ; 4/ Omo EL 338y. Les deux premiers groupes ne divergent que suivant l'axe 2 tandis que KNM-WT 17000 diffère des autres suivant l'axe 2 et l'axe 1. La forme juvénile Omo EL 338y diverge totalement des autres spécimens et se situe au sein des formes correspondant aux premiers *Homo*. Les Chimpanzés varient principalement suivant la valeur de l'axe 2.

Sts 5 et Sts 71 diffèrent comme dans les précédentes comparaisons suivant les axes 1 et 2. Le pariétal droit de Sts 5 présente une forme tridimensionnelle plus proche des Grands Singes que celle de Sts 71, tout comme KNM-ER 1470 par rapport aux autres premiers *Homo*.



Graphique 6 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*.

VII.1.5 Modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers *Homo*

L'axe 1 (figure 145) explique 50,8% de la variance totale contre 18,8% pour l'axe 2, soit 69,6% pour les deux (graphique 7).

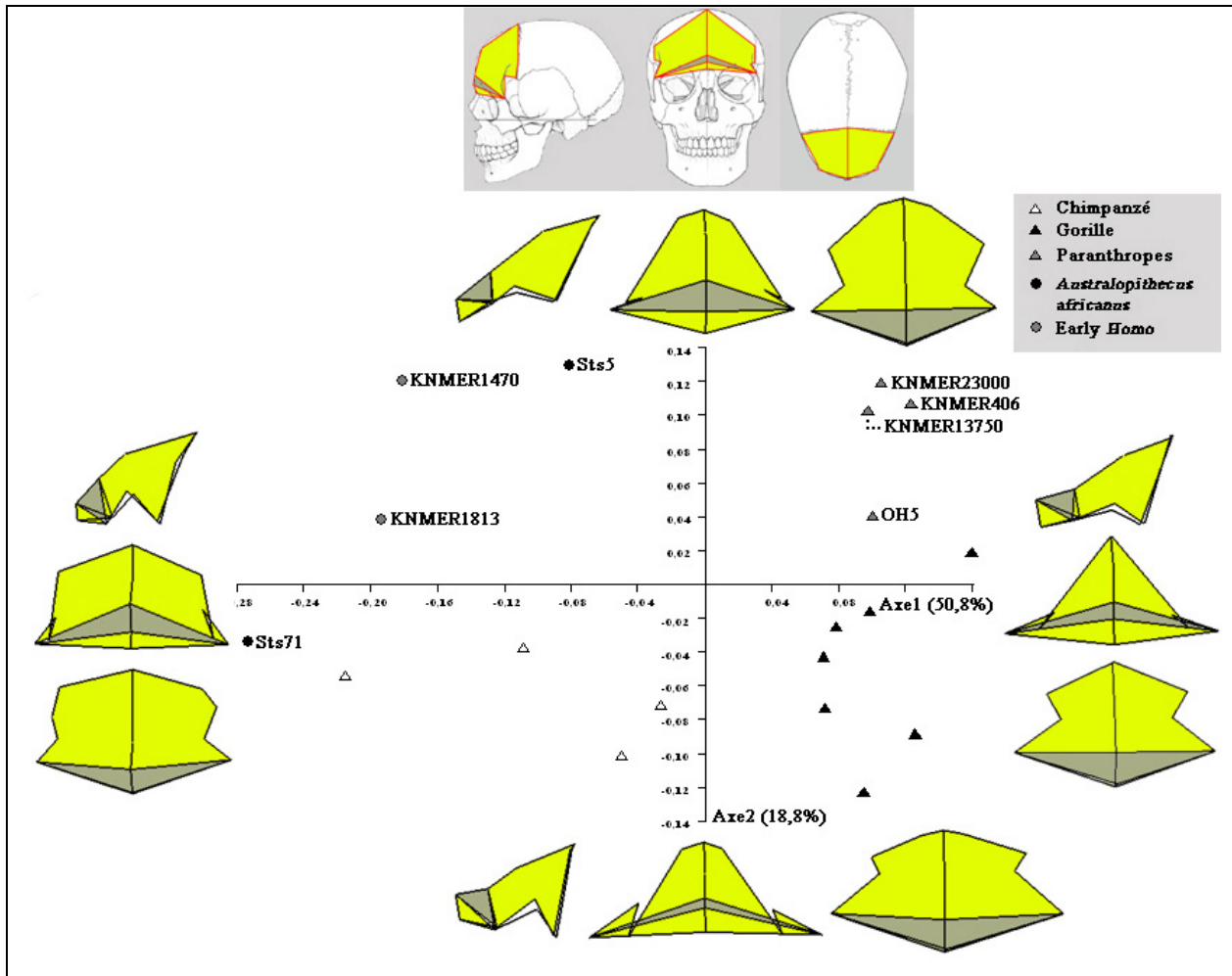


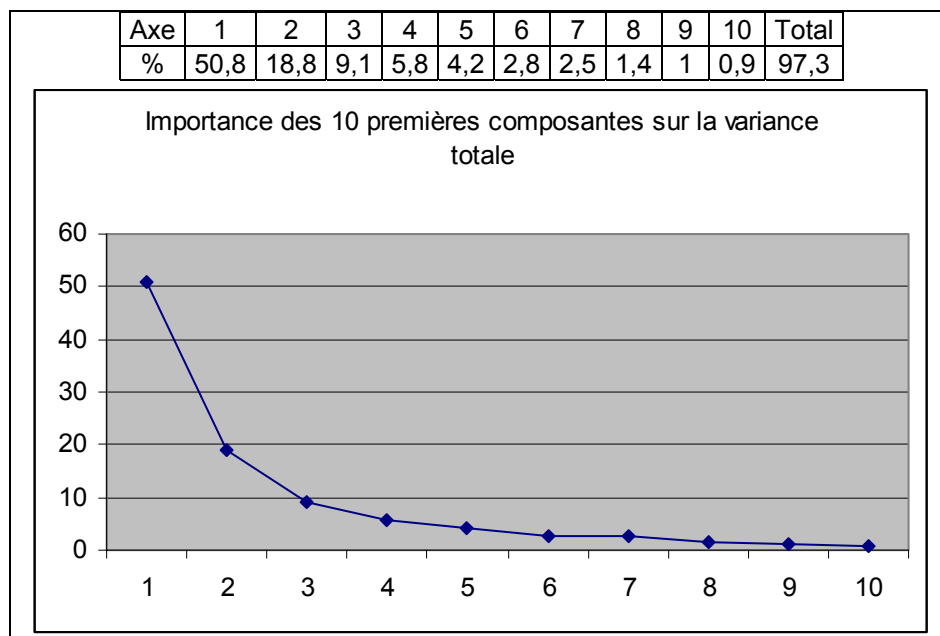
Figure 145 : Analyse en Composantes Principales du frontal des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*. Modélisation tridimensionnelle avec 13 points de repères craniométriques.

Le passage de la valeur maximale de l'axe 1 (Gorilles) à sa valeur minimale (Sts 71) nécessite un changement complet de conformation tridimensionnelle de l'os frontal. Sagittalement le nasion et la glabella sont plus postérieurs alors que le métopion devient plus antérieur. Le point supraglabellaire se positionne plus haut par rapport à la glabella. Ces mouvements contribuent à donner un os frontal plus curviligne en vue latérale et plus compact antéro-postérieurement. En vue frontale et supérieure les stéphanions s'écartent du plan sagittal (donnant ainsi une écaille pentagonale et non plus triangulaire) et se situent plus bas

que le bregma. La constriction post-orbitaire est fortement réduite en raison d'une diminution de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux et un accroissement de la largeur frontale minimale.

Les rapports largeur de la zone orbitaire / largeur de l'écaille cérébrale frontale s'inversent en passant des valeurs minimales de l'axe 2 (Gorilles) aux valeurs maximales (Sts 5). La constriction post-orbitaire est très postérieure (vue supérieure) chez les Gorilles et plus antérieure chez Sts 5. Sagittalement le point supraglabellaire se positionne plus haut que la glabellle ce qui modifie la courbure de l'os frontal. Le métopion est positionné plus haut pour les valeurs maximales de l'axe 2. La largeur bisphénique augmente. Le bregma se situe plus postérieurement par rapport au sphénion.

Il est possible de discriminer les différentes populations étudiées, à l'exception de Sts 71 qui se situe à proximité de l'un des Chimpanzés étudiés (celui-ci ne diffère des autres que par sa position sur l'axe 1), alors que dans les précédentes études réalisées seul Sts 5 se trouvait à proximité des Chimpanzés. Les premiers *Homo* ne peuvent être discriminés que suivant l'axe 2. OH 5 présente une conformation tridimensionnelle proche suivant l'axe 2 de certains Gorilles.



Graphique 7: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers *Homo*.

VII.2 Modélisation tridimensionnelle des espèces du Genre *Homo*

VII.2.1 Modélisation tridimensionnelle des crânes des espèces du genre *Homo* avec 24 points de repères craniométriques

Nous présentons en figures 146 et 147 le résultat de l'ACP réalisée sur les modélisations tridimensionnelles du crâne des spécimens du genre *Homo* avec 24 points. Les noms des différents individus étudiés sont présentés en figure 147.

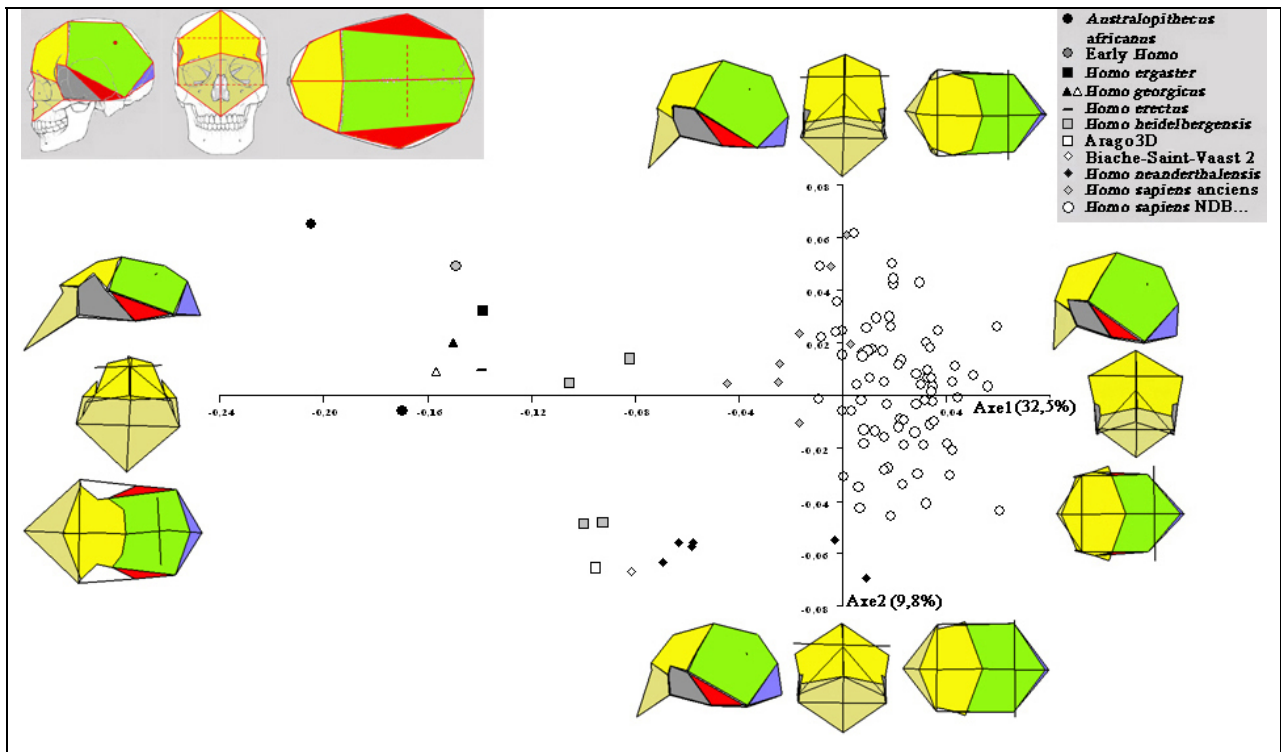


Figure 146 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle du crâne du genre *Homo* avec 24 points de repères craniométriques.

L'axe 1 explique 32,5% de la variance totale contre 9,8% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent 42,3% de la variance totale (graphique 8).

Le passage de la valeur minimale de l'axe 1 (Sts 5) à sa valeur maximale (*Homo sapiens* historiques) nécessite une série de modifications majeures des conformations spatiales. Elles se résument par : 1/ Une réduction des largeurs bilatérales de la partie inférieure du crâne (bijugale, biporion, biastérique et entre les points fronto-malaires temporaux) ; 2/ L'accroissement des largeurs supérieures (entre les points fronto-temporaux, entre les bosses pariétales, bisphénique et bistéphanique). Ce changement des rapports entre les différentes largeurs contribue à réduire la constriction post-orbitaire observée pour passer d'une constriction prononcée (Sts 5) à une constriction inexistante (certains individus de

Notre-Dame-Du-Bourg). Autre conséquence, la zone temporale est masquée par la voûte bipariétale en vue supérieure. Postérieurement la réduction de la largeur biastérique contribue à réduire l'angle astérion – lambda – astérion.

Dans le plan sagittal le passage des valeurs négatives aux positives de l'axe 1 correspond à un positionnement plus postérieur du prosthion (réduction du prognathisme maxillaire), quasiment au niveau du nasion en projection horizontale. L'os frontal est plus bombé du fait d'une avancée du métopion. L'écaille supérieure de l'os frontal s'allonge en raison de cette avancée du métopion et d'un positionnement plus haut du bregma. Le sagittum se situe lui aussi plus haut par rapport à la ligne bregma – lambda. L'opisthocranion se situe sous le lambda en projection horizontale.

Ces modifications contribuent à donner un contour sagittal de plus en plus curviligne (jusqu'à la brachycéphalie) en allant des valeurs négatives à positives de l'axe 1.

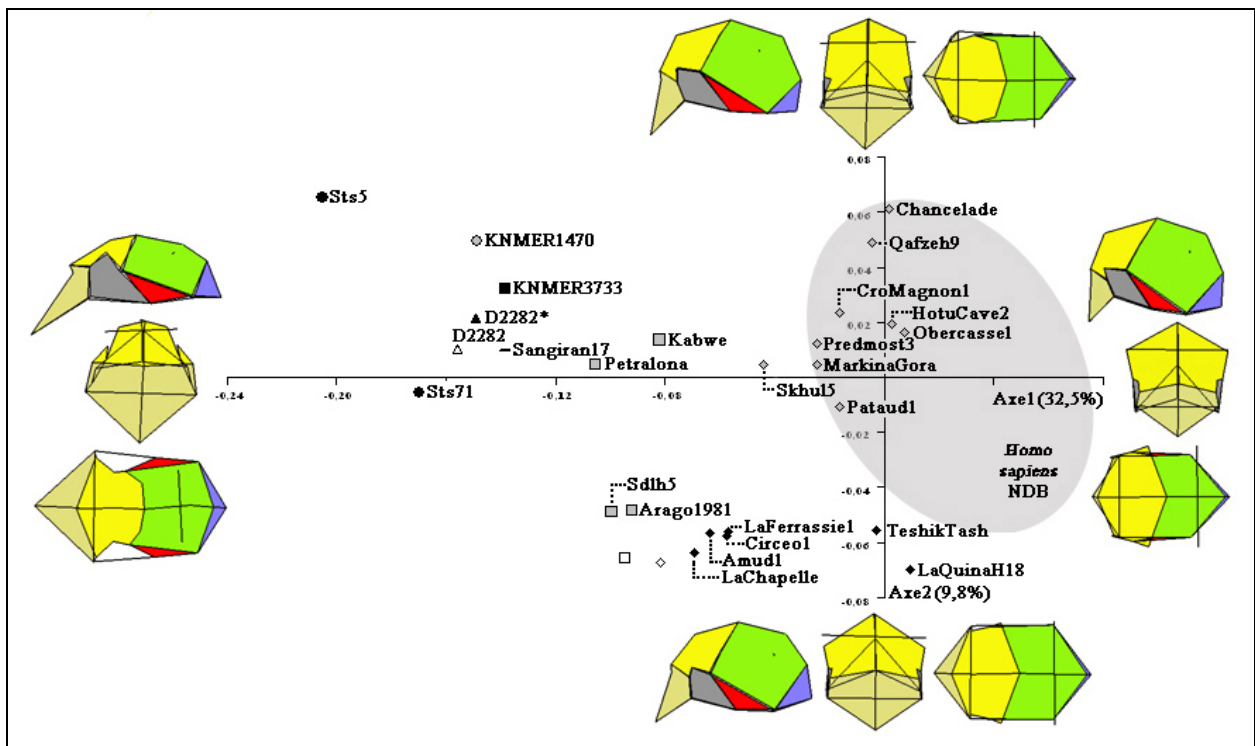


Figure 147 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle du crâne du genre *Homo* avec 24 points de repères craniométriques ; Noms des individus ; D2282* correspond à une version modifiée virtuellement de D2282.

Le passage de la valeur minimale de l'axe 2 (La Quina H18) à sa valeur maximale (Sts 5) nécessite d'autres modifications morphologiques. Le bregma se positionne plus haut tout comme les stéphanions qui se rapprochent du plan sagittal médian. Ceci contribue à donner

une modélisation tridimensionnelle d'aspect étroit en vue frontale. Ceci est accentué par des largeurs bilatérales moindres sur l'ensemble du crâne.

Les bosses pariétales sont plus antérieures dans le plan sagittal. La voûte sagittale devient plus curviligne en allant vers les valeurs positives.

La modélisation tridimensionnelle du crâne de Sts 5 présente la forme la moins étirée et la plus aplatie sur l'axe 1. Sts 71 se distingue de Sts 5 sur l'axe 1 et l'axe 2. Nous trouvons ensuite le long de l'axe 1 le spécimen D2282 de Dmanissi. Nous avons inclus pour comparaison dans l'Analyse en Composantes Principales notre proposition de cet individu (D2282*). Celle-ci a une face moins prognathe et moins large au niveau des arcades orbitaires.

Nous avons ensuite KNM-ER 1470, KNM-ER 3733 et Sangiran 17 qui se différencient surtout suivant l'axe 2, la plus grande largeur faciale (en proportion) correspondant à Sangiran 17. Nous constatons moins de variations entre les trois espèces représentées par ces individus qu'entre les deux *Australopithecus africanus* étudiés.

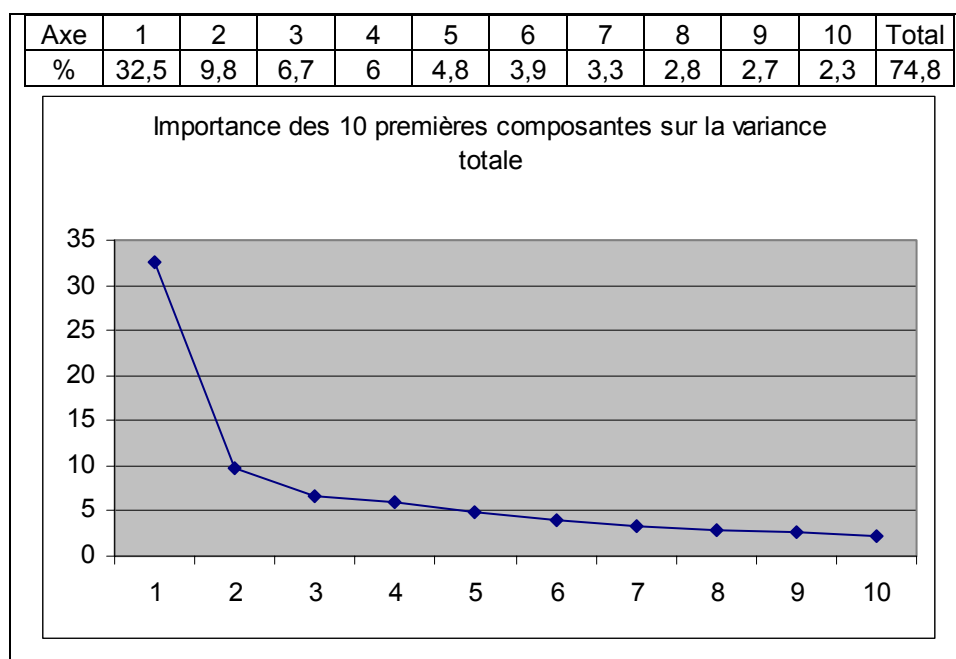
Les individus suivants le long de l'axe 1 sont les représentants des *Homo heidelbergensis*. Alors que les quatre modélisations sont proches sur l'axe 1 (-0,105 à -0,08), celles-ci se distinguent suivant l'axe 2 : entre 0 et +0,02 pour Petralona et Kabwe et entre -0,07 et -0,04 pour Sima de los Huesos 5 et pour Arago3D. En raison de cette différence marquée sur l'Analyse en Composantes Principales, nous considérons ces quatre individus comme deux groupes distincts. Nous trouvons ensuite les Néandertaliens adultes puis les formes juvéniles, avec une valeur supérieure pour l'axe 2. Les Néandertaliens adultes constituent une population très homogène (0,01 de variabilité sur chaque axe) dont la forme consensus sera décrite ultérieurement. Les formes juvéniles étant assez distantes (entre -0 et +0,01 sur l'axe 1 contre -0,07 à -0,06 pour les individus adultes) ne seront pas considérées dans l'étude TPS en raison de leur âge.

Notre proposition de reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2 présente les mêmes valeurs sur l'axe 2 que notre reconstitution de Tautavel et La Chapelle-aux-Saints et ne diffère de ces deux individus que sur l'axe 1 (entre les deux autres spécimens).

Les *Homo sapiens* préhistoriques se différencient des Néandertaliens par une valeur supérieure sur l'axe 1 et l'axe 2, avec un crâne plus haut latéralement, un prognathisme maxillaire moindre. Le crâne est plus étroit en vue frontale et n'a presque plus de constriction orbitaire. Bien que disséminés des valeurs (-0,05 ; +0,005) pour Skhul 5 à (+0 ; +0,06) pour

Chancelade, les individus sont proches les uns des autres et constituent une population continue.

Les *Homo sapiens* historiques représentent la population ayant la plus forte valeur sur l'axe 1, allant de -0,01 à +0,07 et varient le long de l'axe 2 de la valeur -0,045 à +0,06. Certains de ces individus ont une configuration tridimensionnelle identique à celle des *Homo sapiens* préhistoriques : Chancelade, Qafzeh 9, Hotu Cave 2, Obercassel. Pataud et Cro-Magnon 1 en sont assez proches. Par contre, Predmost 3, Markina Gora et surtout Skhul 5 ont une forme plus archaïque.



Graphique 8: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle des crânes du genre *Homo* avec 24 points de repères craniométriques.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 1470 et de KNM-ER 3733

Les crânes KNM-ER 1470 et KNM-ER 3733 ont une conformation spatiale presque identique (figure 148). Il est difficile de relever des différences entre les deux individus. Seuls le bregma, le sagittum et l'opisthocranion sont légèrement positionnés plus haut dans la modélisation tridimensionnelle du crâne de KNM-ER 3733. Son crâne est aussi légèrement plus large en proportion. Pour les deux groupes, la voûte sagittale est basse. L'os frontal est fuyant. Le prognathisme maxillaire est important, tout comme la constriction post-orbitaire. Le massif facial est large. La largeur bijugale est supérieure à la largeur du torus orbitaire.

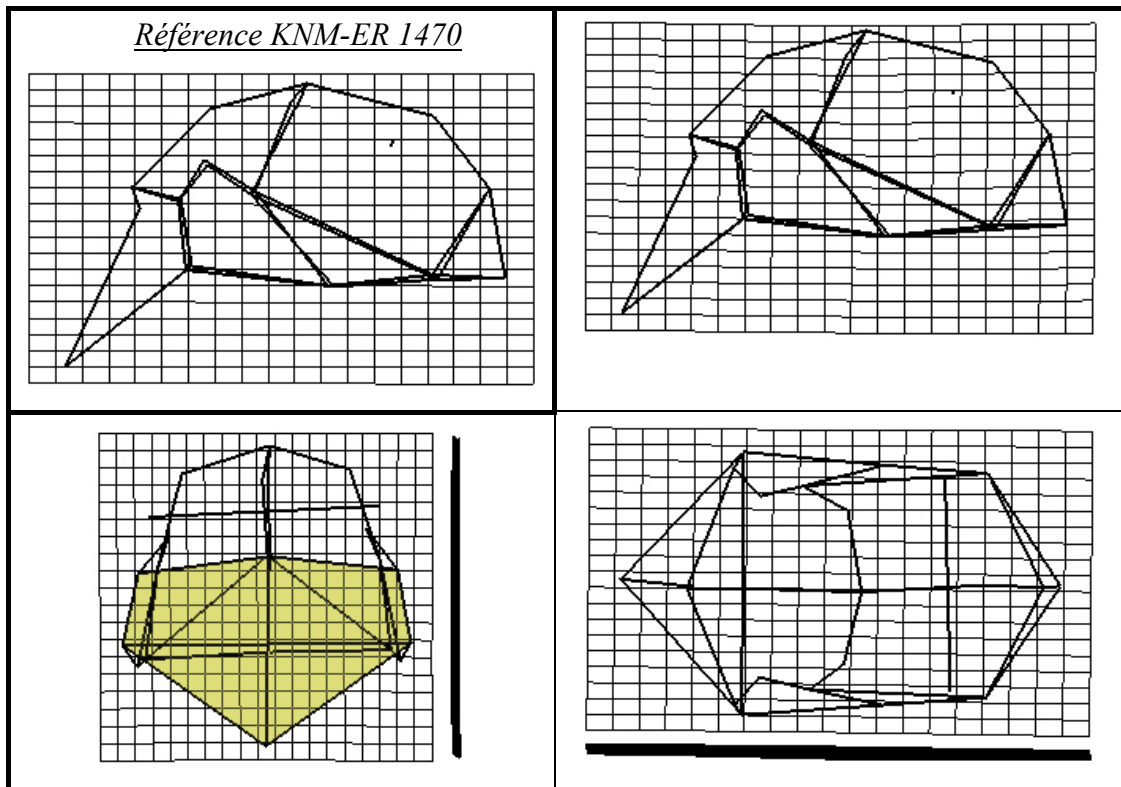


Figure 148 : Comparaison tridimensionnelle des crânes de KNM-ER 1470 et de KNM-ER 3733 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 1470 et de Sangiran 17

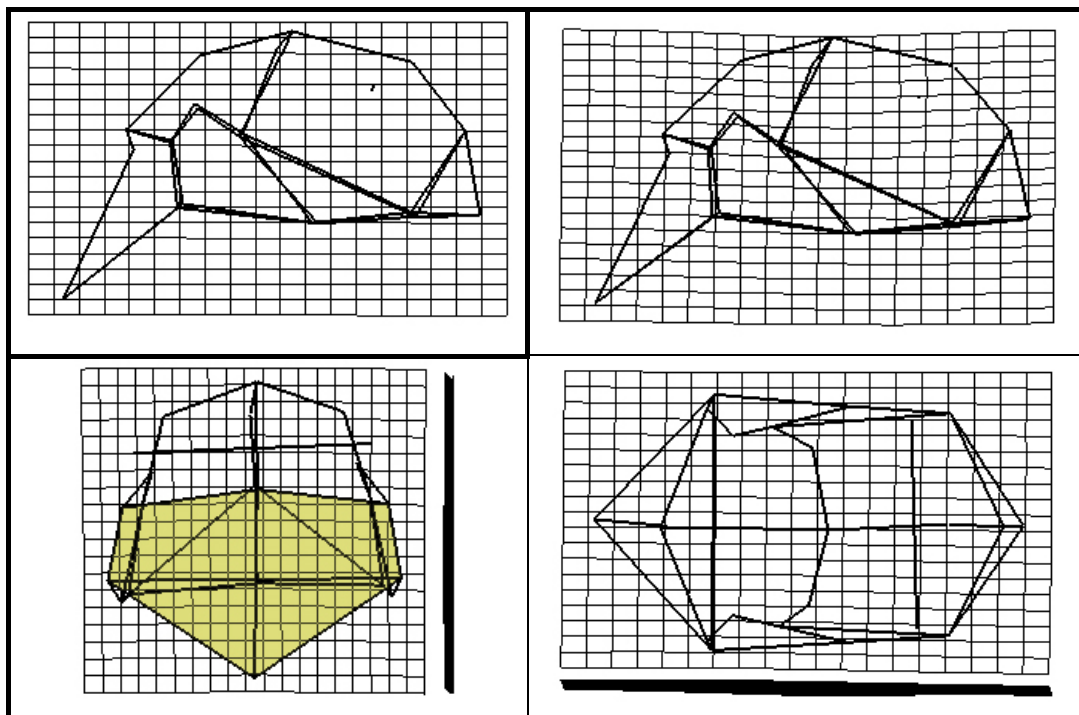


Figure 149 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 1470 et de Sangiran 17 en TPS.

Comme nous l'avons vu précédemment, Sangiran 17 ne diffère de KNM-ER 1470 presque que par l'axe 2 de l'ACP.

La face de Sangiran 17 est légèrement plus large en proportion (figure 149) avec des points jugaux et fronto-malaires temporaux plus externes tandis que les astérions se situent plus antérieurement dans le plan supérieur. Le lambda ainsi que l'opisthocranion se retrouvent en position plus haute en vue latérale.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 1470 et de D2282

KNM-ER 1470 présente un prognathisme facial moins marqué que celui de D2282 (grille latérale, figure 150) et une longueur générale du crâne moindre en proportion. Les vues frontale et supérieure présentent peu de différences. Les stéphanions de ce premier *Homo* sont situés plus haut que ceux de D2282.

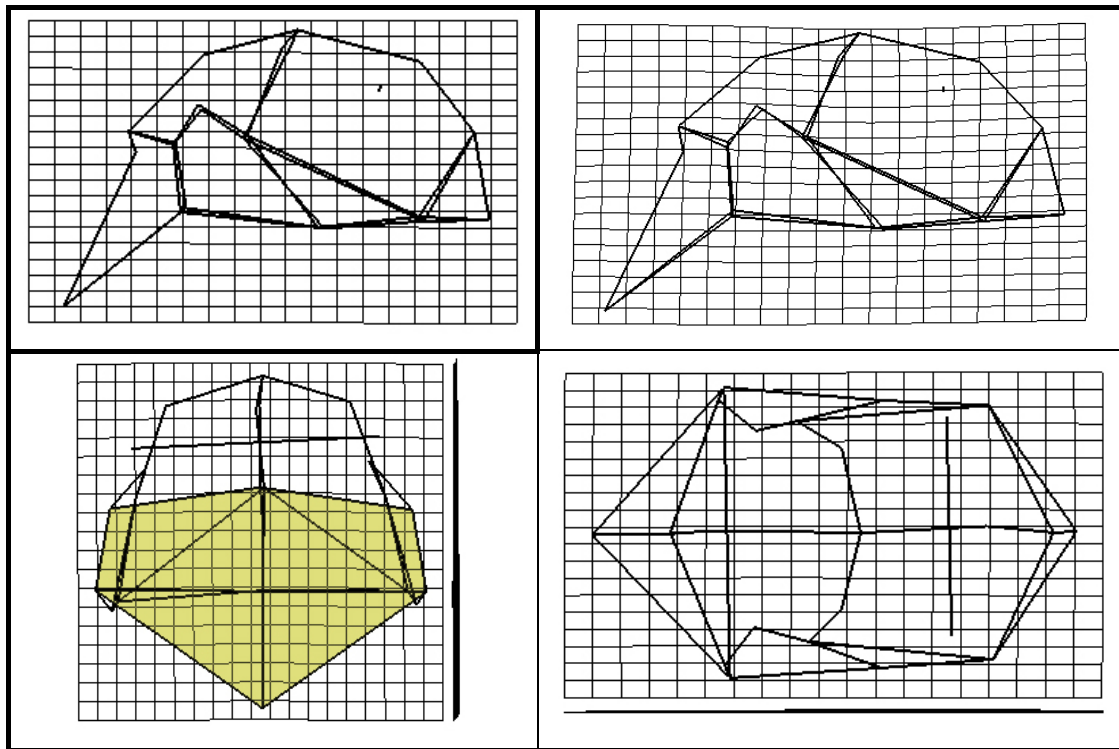


Figure 150 : Comparaison tridimensionnelle des crânes de KNM-ER 1470 et de D2282 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de D2282 et de KNM-ER 3733

KNM-ER 3733 présente un prosthion positionné plus postérieurement que celui de D2282 (figure 151). Le nasion se situe plus antérieurement, la distance nasion – glabella étant inférieure en projection horizontale. Les stéphanions de KNM-ER 3733 sont plus haut et plus externes que ceux de D2282, avec une largeur bilatérale légèrement supérieure. La largeur des arcades orbitaires de l'*Homo ergaster* est moindre tout comme la largeur bijugale.

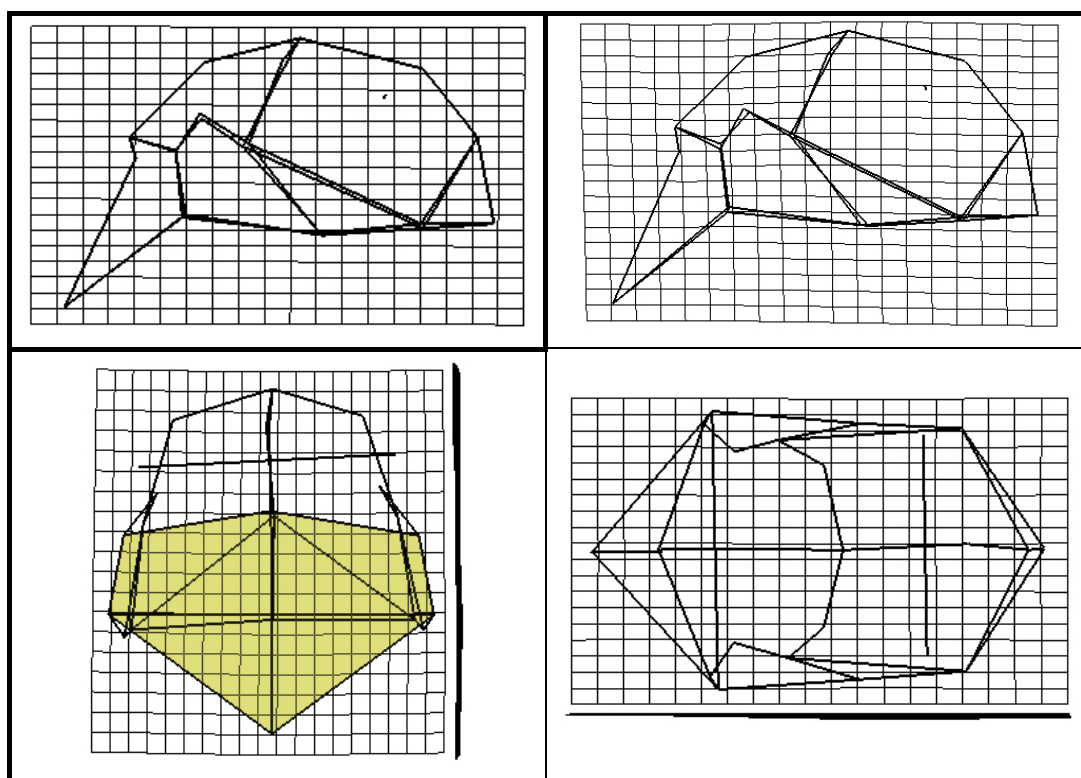


Figure 151 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de D2282 – KNM-ER 3733 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de D2282 et de Sangiran 17

Les largeurs correspondant à la partie supérieure de l'écaille (bistéphanique, bisphénique, bi-bosses pariétales) s'accroissent et s'accompagnent d'une réduction des largeurs inférieures (biporionique, bijugale, biastérique) en passant de D2282 à Sangiran 17 (figure 152). Le prosthion est situé plus postérieurement dans la configuration tridimensionnelle de Sangiran 17 par rapport à la configuration de D2282.

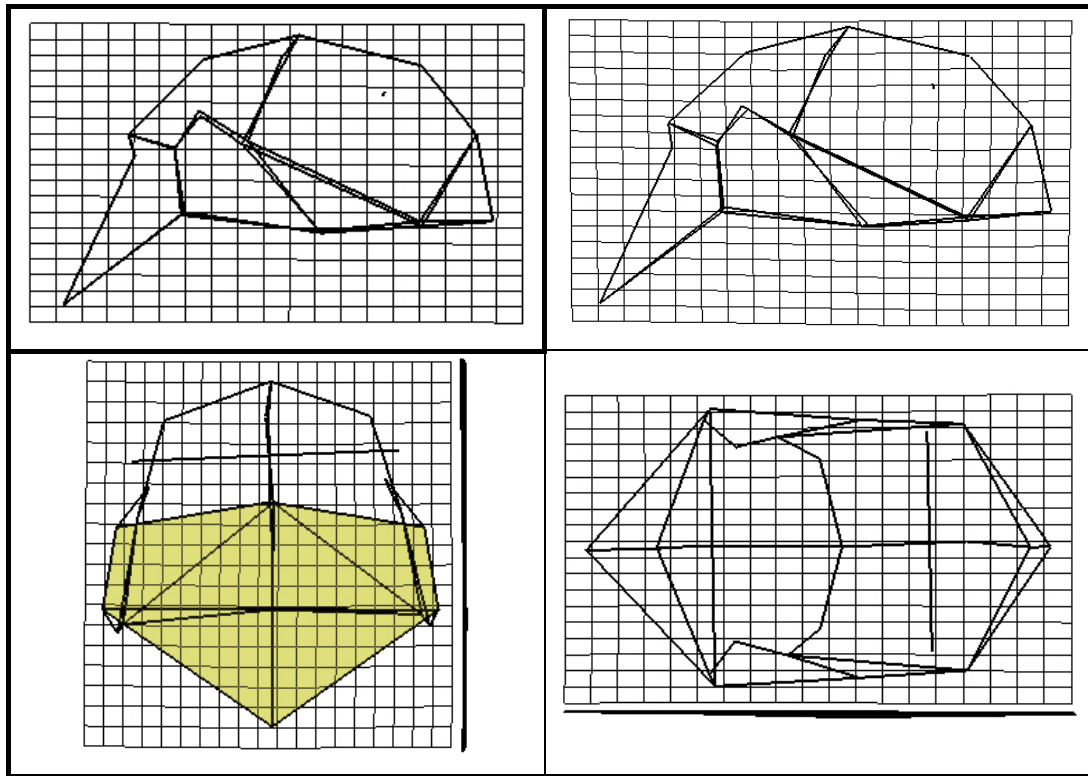


Figure 152 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de D2282 et de Sangiran 17 en TPS.

Nous comparerons les *Homo heidelbergensis* en deux groupes distincts en raison de la répartition différente sur l'ACP. Le premier groupe comporte Arago3D et Sima de los Huesos 5. Le deuxième groupe correspond à Petralona et à Kabwe.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Arago3D-Sdlh5

Le groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 présente un os frontal plus large en vue de face au niveau des stéphanions (figure 153). Avec la diminution de la largeur bijugale (en vue supérieure et de face), l'accroissement de la largeur bistéphanique contribue à donner une face plus verticale par rapport à KNM-ER 3733. Le bregma est surélevé tout comme le lambda, le sagittum et le métopion. L'opisthocranion est relevé en vue latérale, donnant un aspect plus circulaire à la voûte crânienne. Le nasion se retrouve plus avancé alors que le prosthion se situe un peu plus haut et plus postérieurement que chez KNM-ER 3733. En vue supérieure le temporal est plus masqué par la voûte bipariétale.

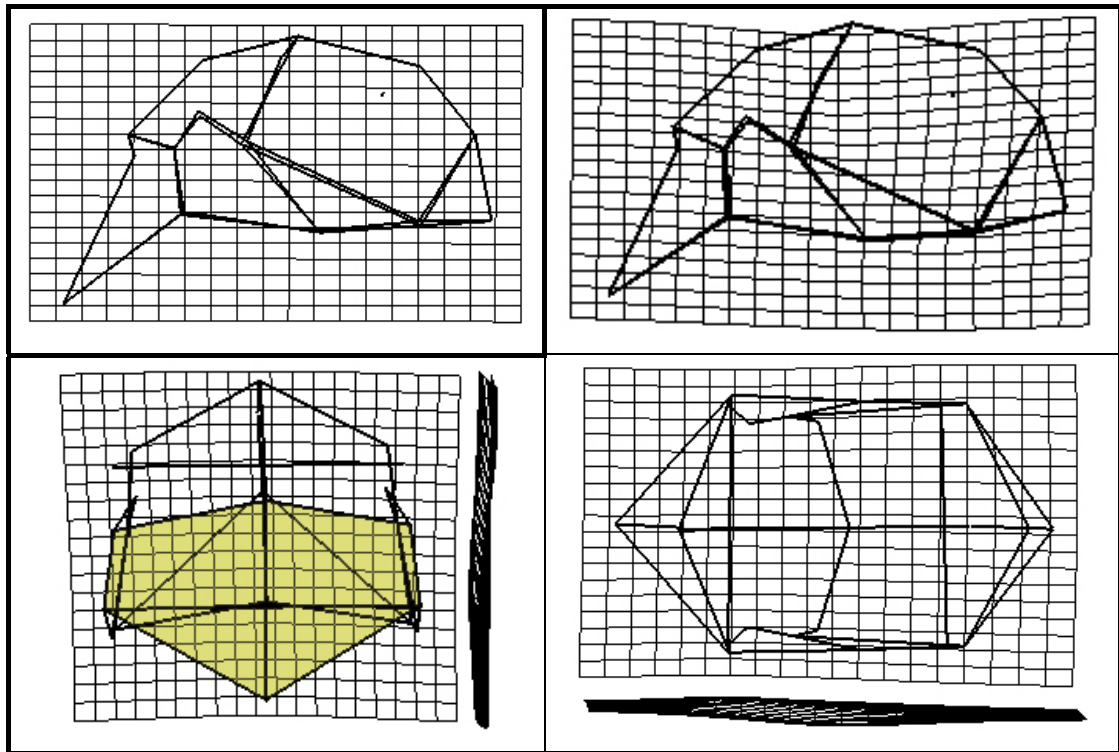


Figure 153 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et Arago3D-Sdlh5 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Petralona-Kabwe

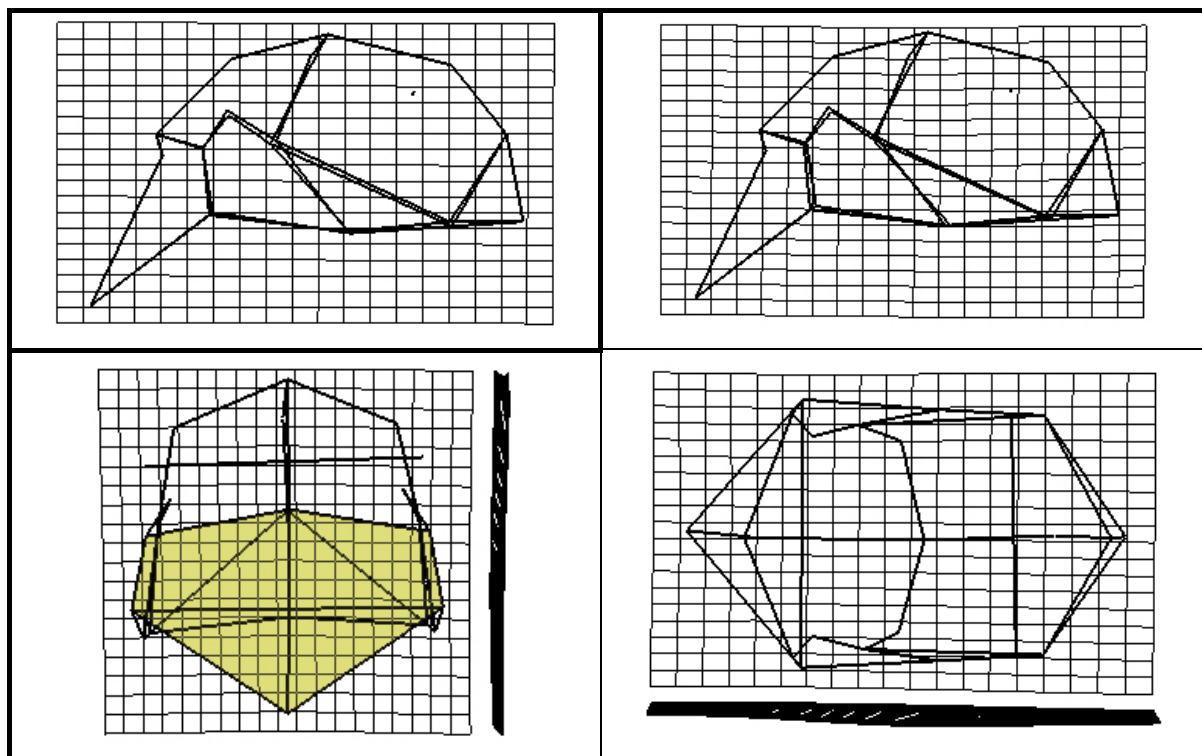


Figure 154 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Petralona-Kabwe en TPS.

Le groupe Petralona – Kabwe présente un bregma légèrement plus haut en vue latérale (figure 154). La largeur frontale est différente, supérieure au niveau des stéphanions pour la forme consensus de ces *Homo heidelbergensis*. La glabellle de la forme consensus se situe aussi légèrement en retrait par rapport à KNM-ER 3733. Les sphénions se situent plus à l'extérieur en vue supérieure. La voûte bipariétale est plus large antérieurement. Comme pour les autres *Homo heidelbergensis* l'os temporal est plus masqué en vue supérieure.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Sangiran 17

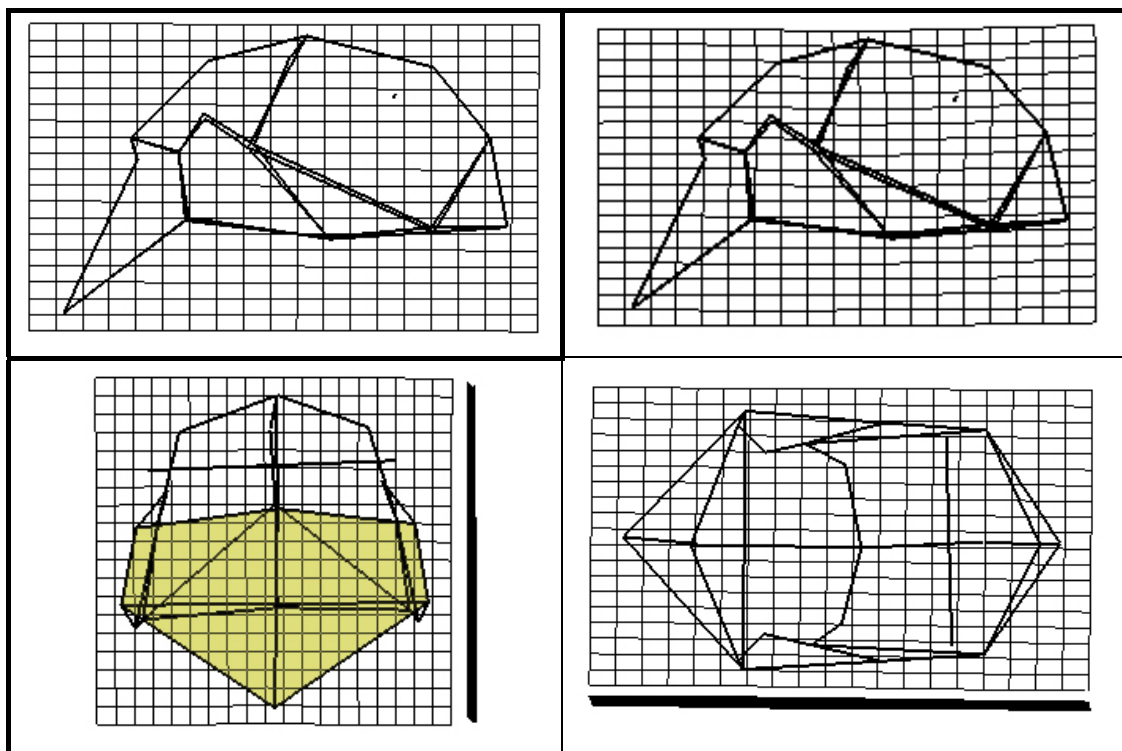


Figure 155 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Sangiran 17 en TPS.

KNM-ER 3733 et Sangiran 17 sont très semblables (mêmes positions sur l'axe 1) et ne varient que suivant l'axe 2 de l'ACP. Les différences entre les deux modélisations tridimensionnelles se limitent au positionnement des stéphanions, plus externes sur Sangiran 17 (figure 155) et à l'accroissement de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux pour le crâne de Sangiran 17.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et des *Homo sapiens* préhistoriques

Le passage de la configuration tridimensionnelle de KNM-ER 3733 à celle des *Homo sapiens* nécessite une série de modifications majeures (figure 156).

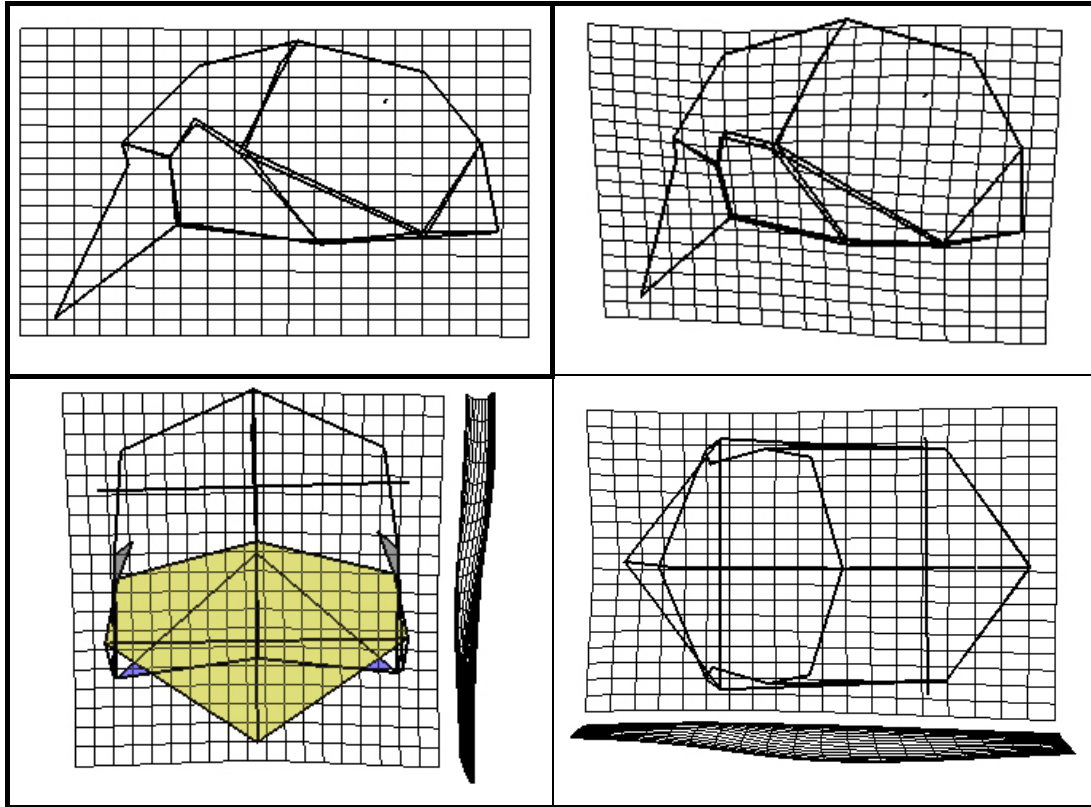


Figure 156 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Le prognathisme facial est fortement réduit (1/3 de moins en projection horizontale) avec un recul du prosthion. La largeur de la face diminue avec un point jugal plus interne. Le nasion est moins postérieur par rapport à la glabella. L'os frontal est plus bombé avec un métopion plus antérieur et un bregma plus haut. Les points fronto-temporaux sont plus antérieurs. En vue supérieure la constriction post-orbitaire n'est presque plus discernable. Les stéphanions sont situés plus haut et plus latéralement en vue de face. La voûte bipariétale est plus large (au niveau des bosses pariétales), plus longue (bregma plus haut et lambda plus en retrait) et plus haute (hausse du sagittum). La zone temporale (triangle porion – astérion – sphénion) paraît stable, mais est totalement masquée par la voûte bipariétale en vue supérieure. L'opisthocranion est plus élevé et se situe en-dessous du lambda en vue supérieure.

Le crâne des *Homo sapiens* est plus curviligne (brachycéphalie) et plus large au niveau de la calotte crânienne. La face et l'os frontal ont un aspect vertical et non plus pyramidal.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes d'*Homo sapiens* préhistoriques et d'*Homo sapiens* historiques

Les *Homo sapiens* historiques présentent des différences peu marquées par rapport aux formes préhistoriques (figure 157).

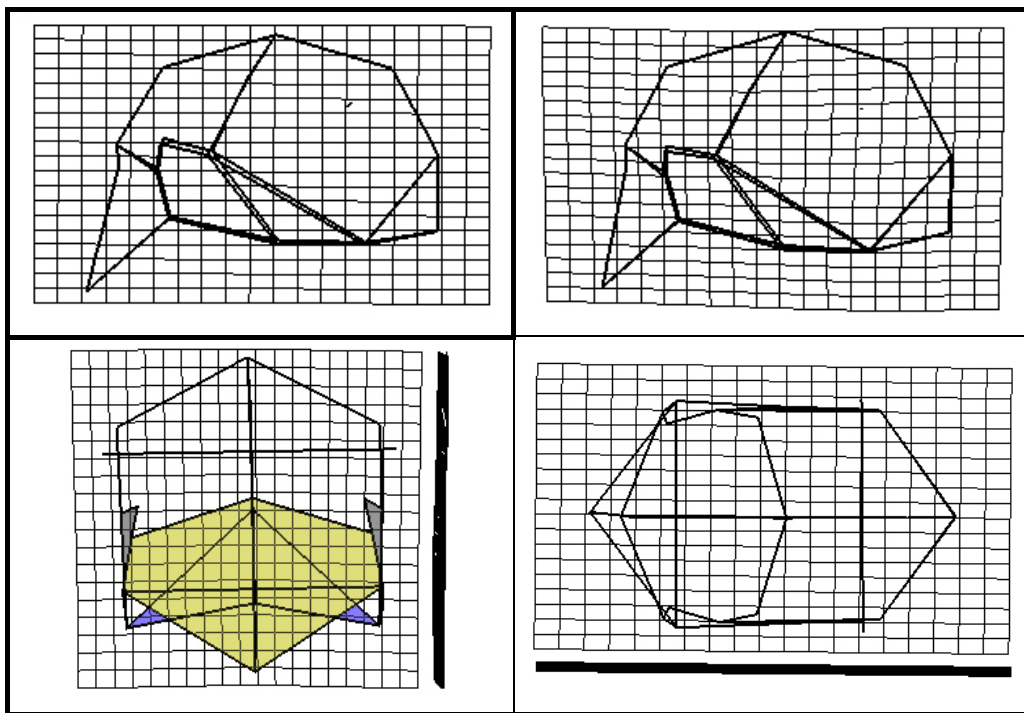


Figure 157 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes d'*Homo sapiens* préhistoriques et historiques en TPS.

La face est moins prognathe chez les spécimens historiques. Le point fronto-temporal est plus externe. Le métopion est avancé. Le sagittum se situe un peu plus haut. Les stéphanions sont positionnés plus extérieurement.

En vue de face, le bloc facial présente un aspect rectangulaire, voir divergent vers le haut pour la forme consensus des individus historiques. La section de la calotte crânienne est pentagonale en vue frontale. Le crâne présente un aspect rectangulaire en vue supérieure tandis que latéralement le contour sagittal est plus courbé (tendance à la brachycéphalie).

Le passage des individus préhistoriques à ceux historiques ne correspondant qu'à une accentuation des caractères de la population plus ancienne, nous conserverons celle-ci comme référence pour la comparaison des individus fossiles avec les *Homo sapiens*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Arago3D-Sdlh5 et Petralona-Kabwe

Les deux groupes d'*Homo heidelbergensis* diffèrent en vue latérale (figure 158) avec un métopion plus haut pour les premiers et plus en retrait pour le groupe Petralona – Kabwe. Le prosthion est plus postérieur chez Petralona – Kabwe, donnant une face moins prognathe. Le bregma se situe plus haut chez ces derniers avec un lambda plus postérieur. Ce positionnement différent donne une voûte plus allongée.

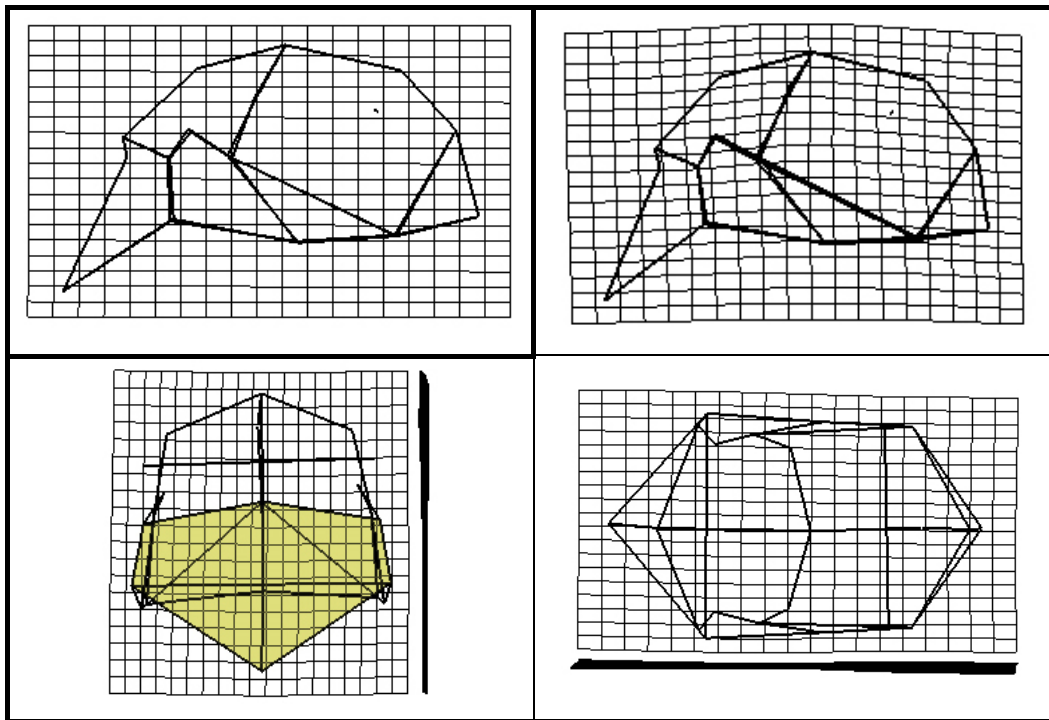


Figure 158 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et Petralona-Kabwe en TPS.

Le groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 présente un crâne plus large postérieurement et antérieurement avec une constriction post-orbitaire plus faible (hausse supérieure de la largeur fronto-temporale). Son opisthocranion est plus postérieur ce qui contribue avec le prosthion plus avancé à donner un crâne plus allongé.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Arago3D-Sdlh5 et de Sangiran 17

Sangiran 17 a une conformation spatiale plus archaïque que ces deux *Homo heidelbergensis* avec un prosthion plus antérieur et une voûte crânienne plus basse (figure 159). La distance entre les deux astérions est nettement inférieure à celle entre les porions, ce

qui n'est quasiment plus le cas pour Arago3D et Sima de los Huesos 5. La constriction post-orbitaire de cet *Homo erectus* est plus marquée que pour les deux autres fossiles. La vue frontale permet de mettre en évidence une largeur bijugale bien plus large chez Sangiran 17.

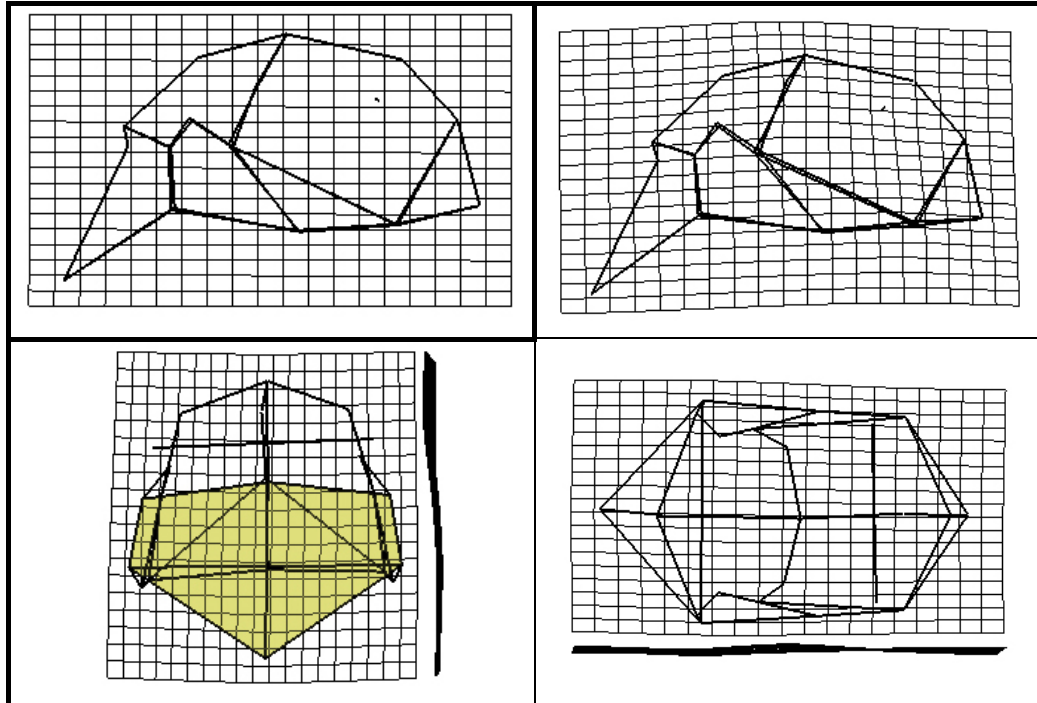


Figure 159 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et de Sangiran 17 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Arago3D-Sdlh5 et d'*Homo neanderthalensis*

Nous ne constatons pas de différences au niveau des largeurs bilatérales entre les deux groupes étudiés à l'exception : 1/ Des largeurs bijugale et biporionique qui sont plus faibles chez les Néandertaliens ; 2/ Des largeurs bisphénique, bistéphanique qui s'accroissent pour les Néandertaliens (figure 160). Ceci génère une constriction post-orbitaire moindre ainsi qu'une écaille frontale de moins en moins convergente postérieurement.

Les bosses pariétales se situent pour les Néandertaliens plus à l'extérieur que la modélisation de la suture pariéto-temporale alors qu'elles se trouvent au niveau de cette suture pour les *Homo heidelbergensis*. En vue latérale le prognathisme facial. L'opisthocranion est légèrement antérieur. Ces deux modifications, associées à une légère hausse sagittale de la voûte crânienne, contribuent à donner un crâne moins court en proportion et plus curviligne.

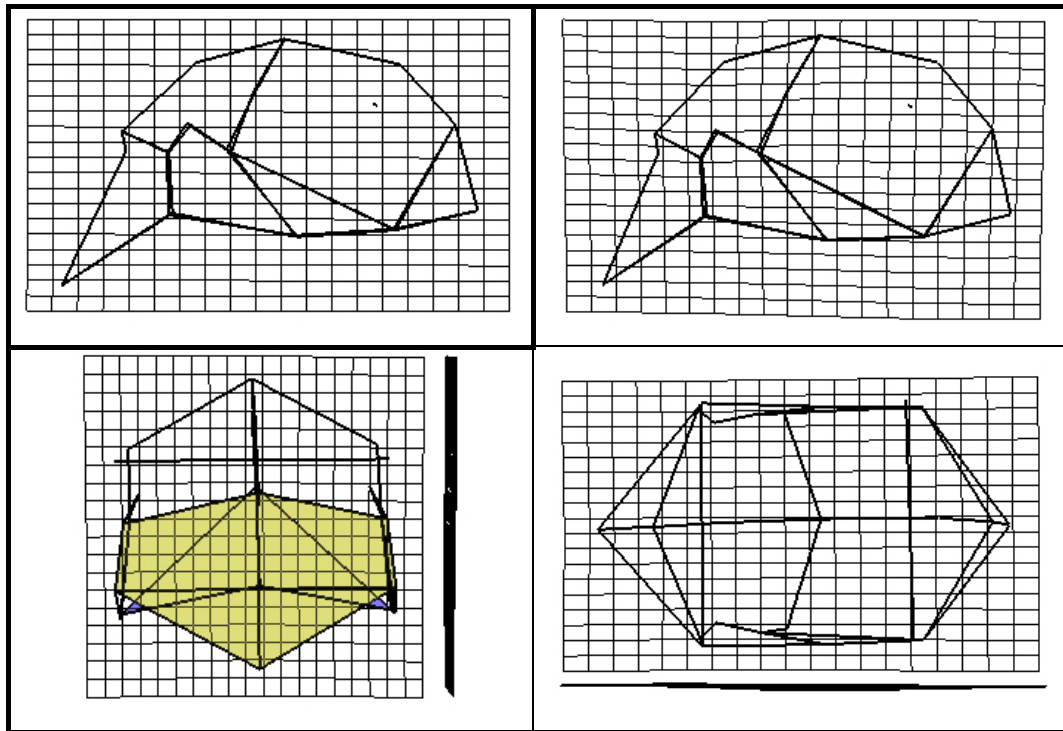


Figure 160 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et d'*Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Arago3D-Sdlh5 et d'*Homo sapiens* préhistoriques

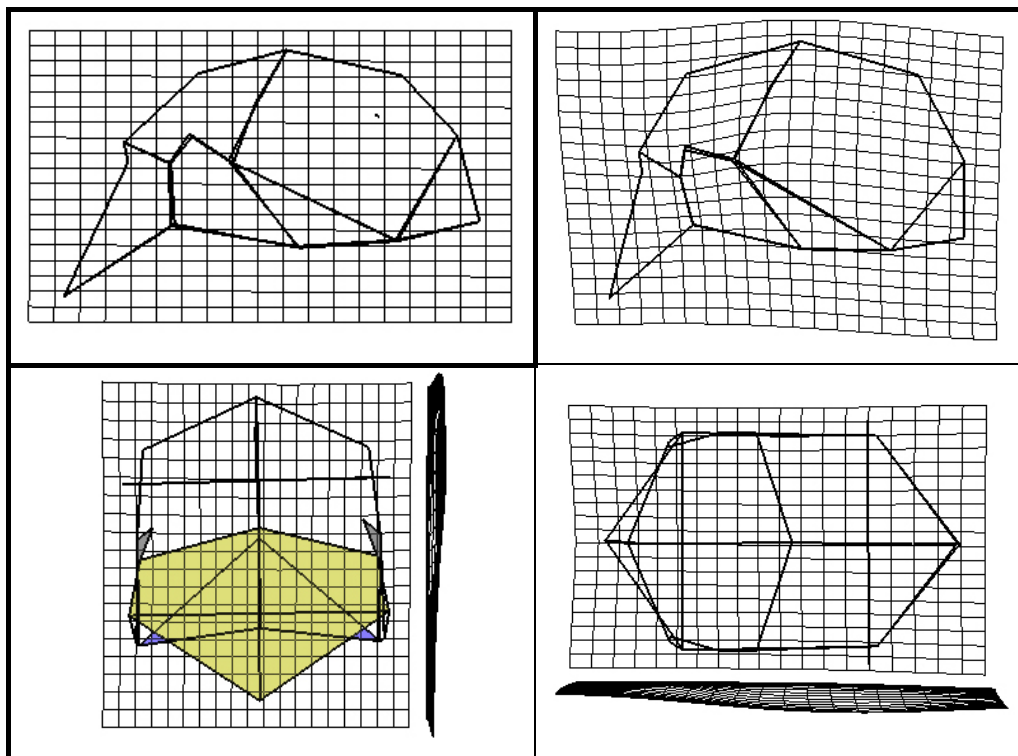


Figure 161 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et d'*Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Les différences entre ces deux *Homo heidelbergensis* et les *Homo sapiens* préhistoriques sont multiples et marquées (figure 161).

Les modélisations TPS permettent d'observer une poussée de la voûte crânienne, plus globuleuse, avec un métopion plus antérieur, un bregma et un sagittum plus haut. Le sagittum est aussi plus antérieur. Le positionnement de ces points de repères, accompagné du recul du prosthion, contribue à donner un contour sagittal plus curviligne (tendance à la brachycéphalie). Les stéphanions sont plus bas et plus externes et la largeur bijugale a diminué. Le crâne des *Homo sapiens* préhistoriques présente un contour de type pentagonoïde en vue supérieure avec une constriction post-orbitaire quasiment inexistante.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Petralona-Kabwe et de Sangiran 17

Sangiran 17 présente une configuration tridimensionnelle plus plésiomorphe que ces deux *Homo heidelbergensis* avec un prosthion plus antérieur et une voûte crânienne plus basse (figure 162).

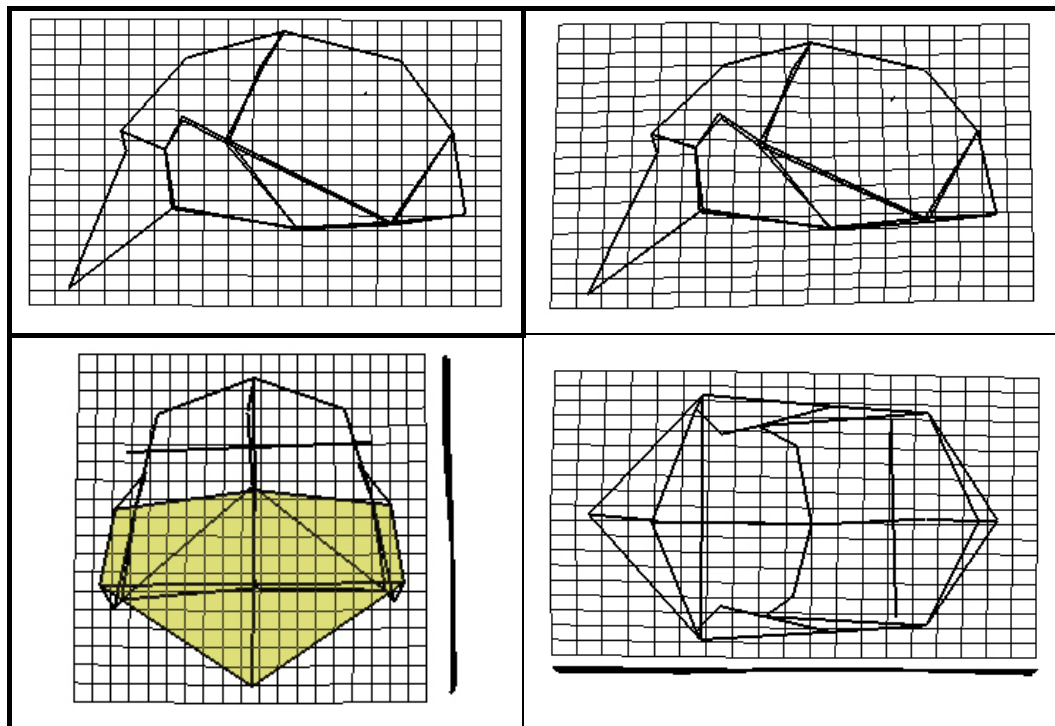


Figure 162 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Petralona-Kabwe – Sangiran 17 en TPS.

La distance entre les deux astérions est inférieure à celle entre les porions à la différence des deux *Homo heidelbergensis*. La constriction post-orbitaire de cet *Homo erectus*

est plus marquée que chez les deux autres fossiles. La vue frontale permet de mettre en évidence une largeur bijugale plus large chez Sangiran 17, mais les différences de largeurs bilatérales sont moins marquées que pour la comparaison de Sangiran 17 avec les deux autres *Homo heidelbergensis*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Petralona-Kabwe et d'*Homo neanderthalensis*

Le passage de ces *Homo heidelbergensis* aux Néandertaliens nécessite une réduction de la longueur générale du crâne avec un recul du prosthion (figure 163). La distance bregma – lambda se réduit en proportion. Sagittalement la voûte néandertalienne est plus bombée avec un métopion plus haut. La largeur jugale diminue avec en parallèle l'accroissement de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux. Au niveau postérieur nous constatons un accroissement de la largeur biastérique. La zone temporale est presque masquée en vue supérieure par la modélisation de la voûte bipariétale.

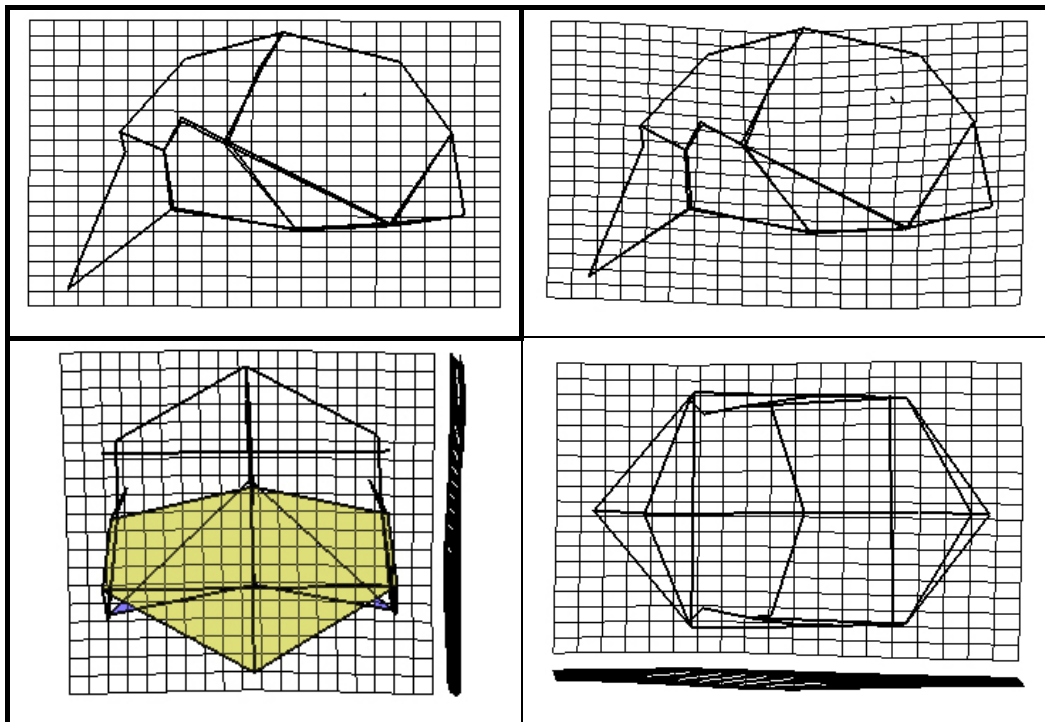


Figure 163 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Petralona-Kabwe et d'*Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes Petralona-Kabwe et d'*Homo sapiens* préhistoriques

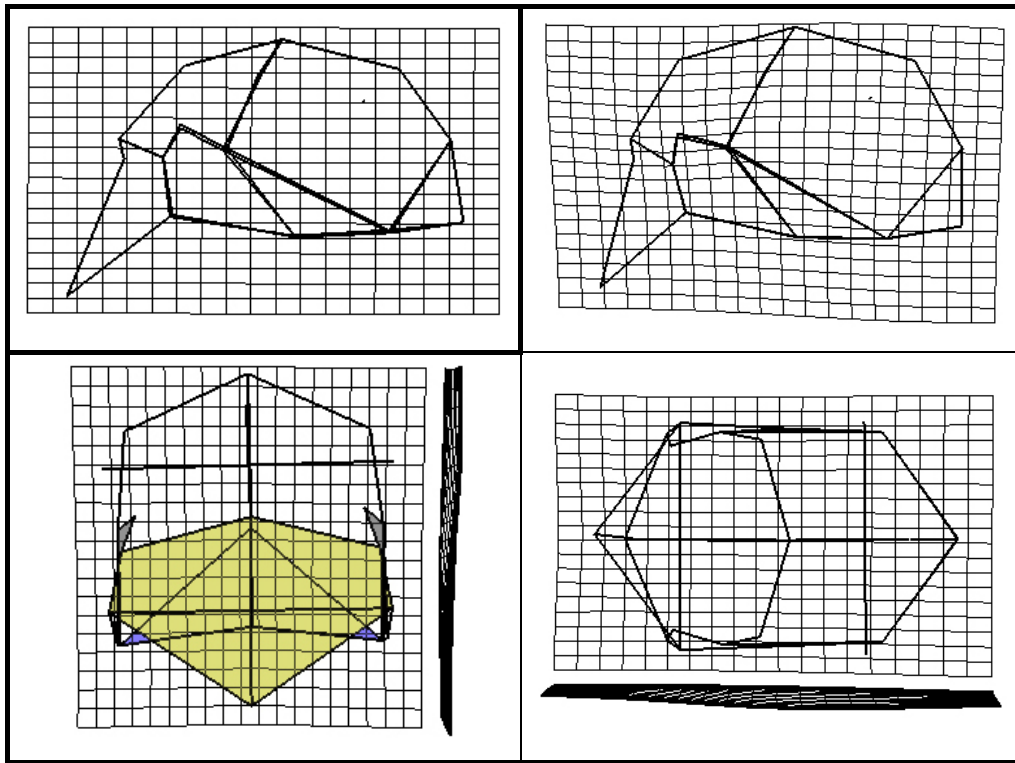


Figure 164 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Petralona-Kabwe et d'*Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Des différences sont notables entre ces deux *Homo heidelbergensis* et les *Homo sapiens* préhistoriques (figure 164). Le recul du prosthion s'accompagne d'une avancée du métopion, conférant un aspect plus vertical à la face des *Homo sapiens* en vue latérale. Le bregma situé plus haut tout comme le sagittum donne à la voûte crânienne un aspect plus courbé dans le plan sagittal (tendance à la brachycéphalie). Les stéphanions sont plus bas et plus externes et la largeur bijugale a diminué. Le crâne des *Homo sapiens* préhistoriques présente un contour de type pentagonoïde en vue supérieure avec une constriction post-orbitaire presque inexistante. La zone temporale est presque totalement masquée par la voûte bipariétale en vue supérieure.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Sangiran 17 et d'*Homo sapiens* préhistoriques

Les différences entre Sangiran 17 et les *Homo sapiens* préhistoriques (figure 165) sont plus marquées que celles entre ces *Homo sapiens* préhistoriques et les différents *Homo heidelbergensis*. Sangiran 17 est plus prognathe que les *Homo sapiens* préhistoriques avec un

prosthion très avancé. Ce caractère est accentué par une voûte sagittale plus basse (métopion, bregma, sagittum). Ceci contribue à donner une face d'aspect très fuyant. En vue frontale on observe nettement l'accroissement de la partie supérieure du crâne (largeur bosse bipariétale largement supérieure) chez les *Homo sapiens* préhistoriques, notamment au niveau des stéphanions, sphénions et bosses temporales.

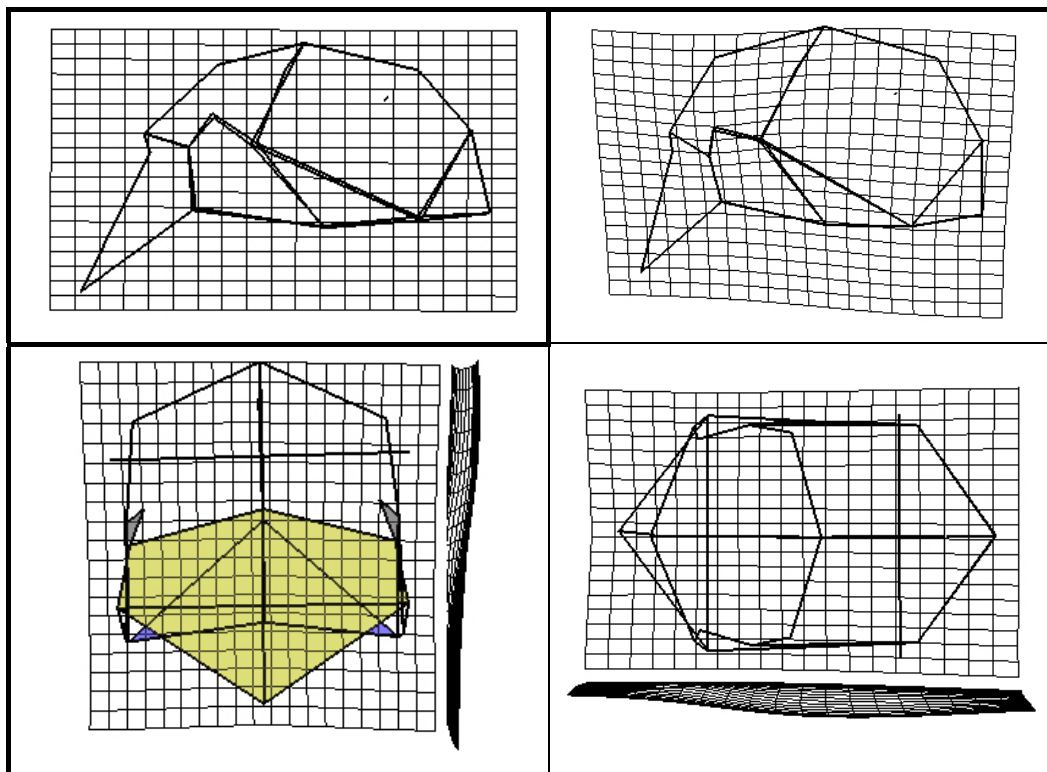


Figure 165 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Sangiran 17 et d'*Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes d'*Homo neanderthalensis* et d'*Homo sapiens* préhistoriques

Les *Homo sapiens* préhistoriques se différencient des Néandertaliens par une valeur supérieure sur l'axe 1 et l'axe 2, avec un crâne plus haut sagittalement (figure 166), plus étroit en vue frontale avec une constriction orbitaire quasi inexistante et un prognathisme facial moindre. En vue supérieure, les bosses bipariétales se situent plus antérieurement que celles sur le crâne des Néandertaliens. Le crâne présente aussi un aspect pentagonoïde en vue supérieure.

Au total les conformations tridimensionnelles sont différentes pour ces deux populations.

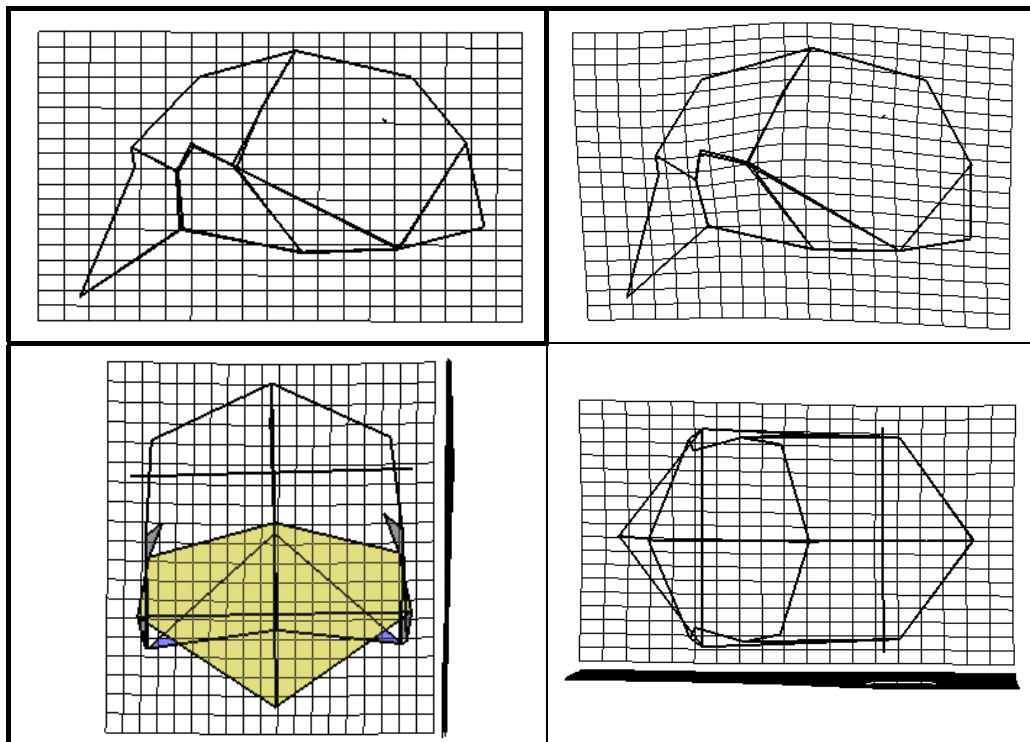


Figure 166 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes d'*Homo neanderthalensis* et d'*Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

VII.2.2 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne des espèces du genre *Homo* avec 21 points de repères craniométriques

Nous présentons en figure 167 le résultat de l'ACP réalisée sur les modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne avec 21 points, pour le genre *Homo*. Les noms des différents individus étudiés sont indiqués dans les figures 168 et 169.

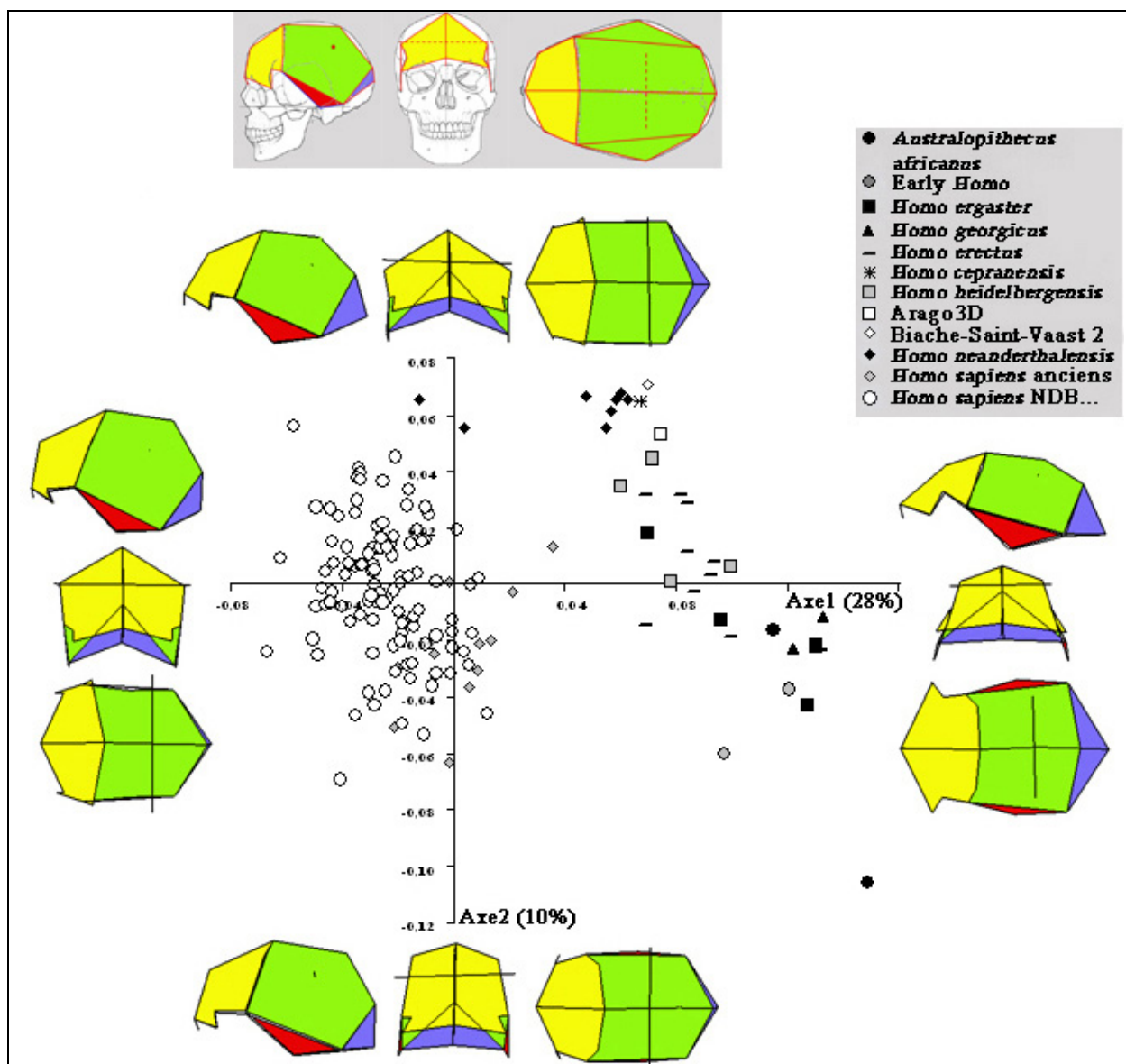


Figure 167 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre *Homo* avec 21 points de repères craniométriques.

L'axe 1 explique 28% de la variance totale des individus étudiés contre 10% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent 38% de la variance totale (graphique 9).

Le passage de la valeur maximale de l'axe 1 (Sts 5) à sa valeur minimale (*Homo sapiens* historiques) nécessite : 1/ Une réduction de la largeur postéro-inférieure de la calotte crânienne (astérions plus internes, plus avancés et plus bas) ; 2/ L'accroissement de la largeur antéro-inférieure (sphénions et points fronto-temporaux plus externes) ; 3/ La réduction de la constriction post-orbitaire qui passe de forte à inexistante (diminution de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux et accroissement de la largeur minimale plus antérieure).

Les largeurs entre les bosses pariétales et les stéphanions s'accroissent avec un positionnement plus externe de ces points par rapport au plan sagittal. La combinaison de ces modifications contribue à donner une calotte crânienne plus bombée en section frontale en allant des valeurs maximales aux valeurs minimales de l'axe 1, divergente vers le haut jusqu'au niveau des stéphanions et bosses pariétales qui dépassent.

Plus la valeur de l'axe 1 est faible, plus le porion est interne par rapport à la voûte bipariétale. Nous passons d'un porion visible à un porion masqué en vue supérieure. L'avancée des astérions contribue à réduire le triangle temporal modélisé.

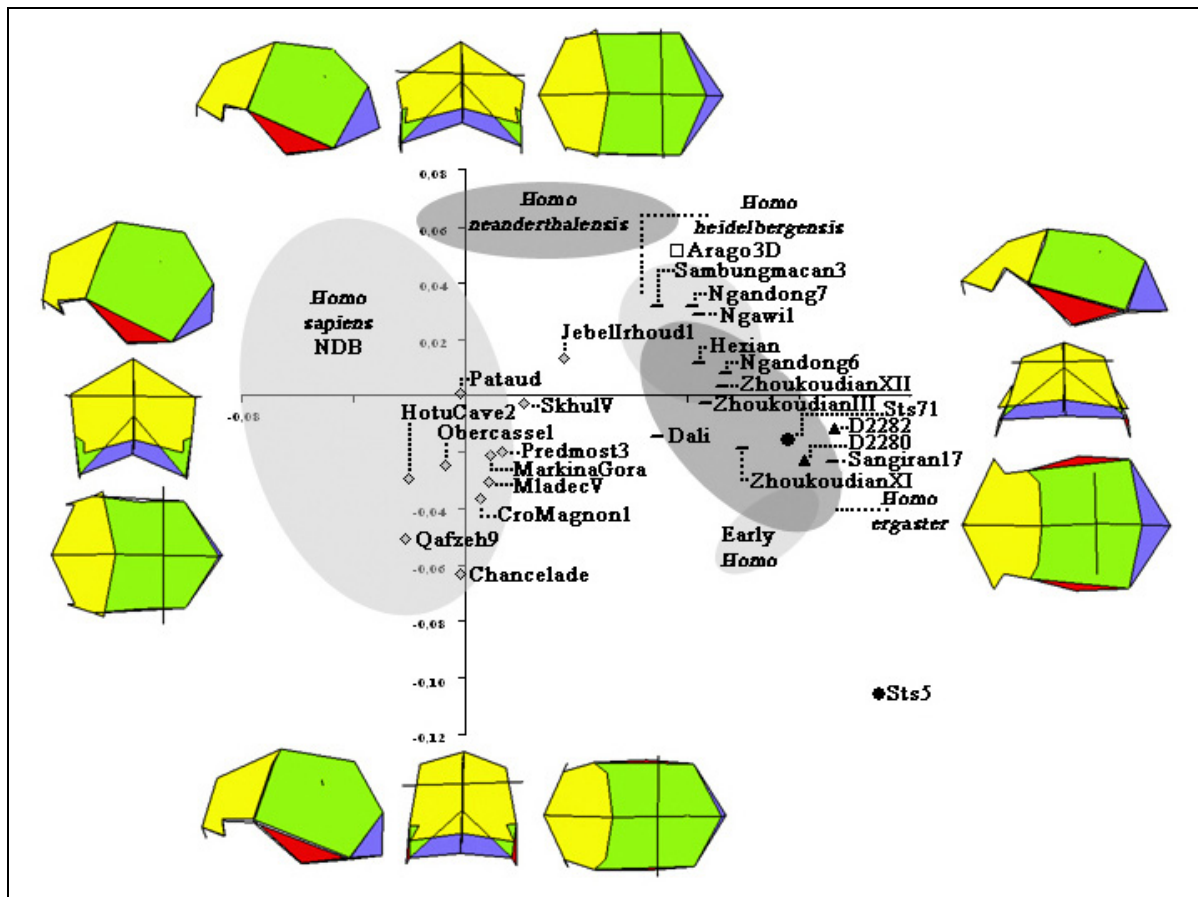


Figure 168 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre *Homo* avec 21 points de repères craniométriques ; Noms des individus.

L'opisthocranion s'avance dans l'espace et passe d'une position postérieure à inférieure sous le lambda. Ceci est accentué par le recul et l'élévation du lambda. Ce mouvement accompagne l'avancée et l'élévation du bregma. L'élévation de ces points de repères correspond à un bombement de la voûte crânienne et entraîne une élévation du sagittum et du métopion.

Au total, en allant des valeurs maximales aux valeurs minimales de l'axe 1, nous passons d'une calotte crânienne de forme sphéroïde à une calotte crânienne de type pentagonoïde en vue supérieure. Sagittalement la calotte crânienne est plus bombée, plus circulaire (tendance à la brachycéphalie). Ceci est accentué par l'avancée et la descente des astérions qui contribuent à courber l'alignement opisthocranion – astérion – porion et qui donnent un aspect curviligne de la base de la calotte crânienne en vue latérale.

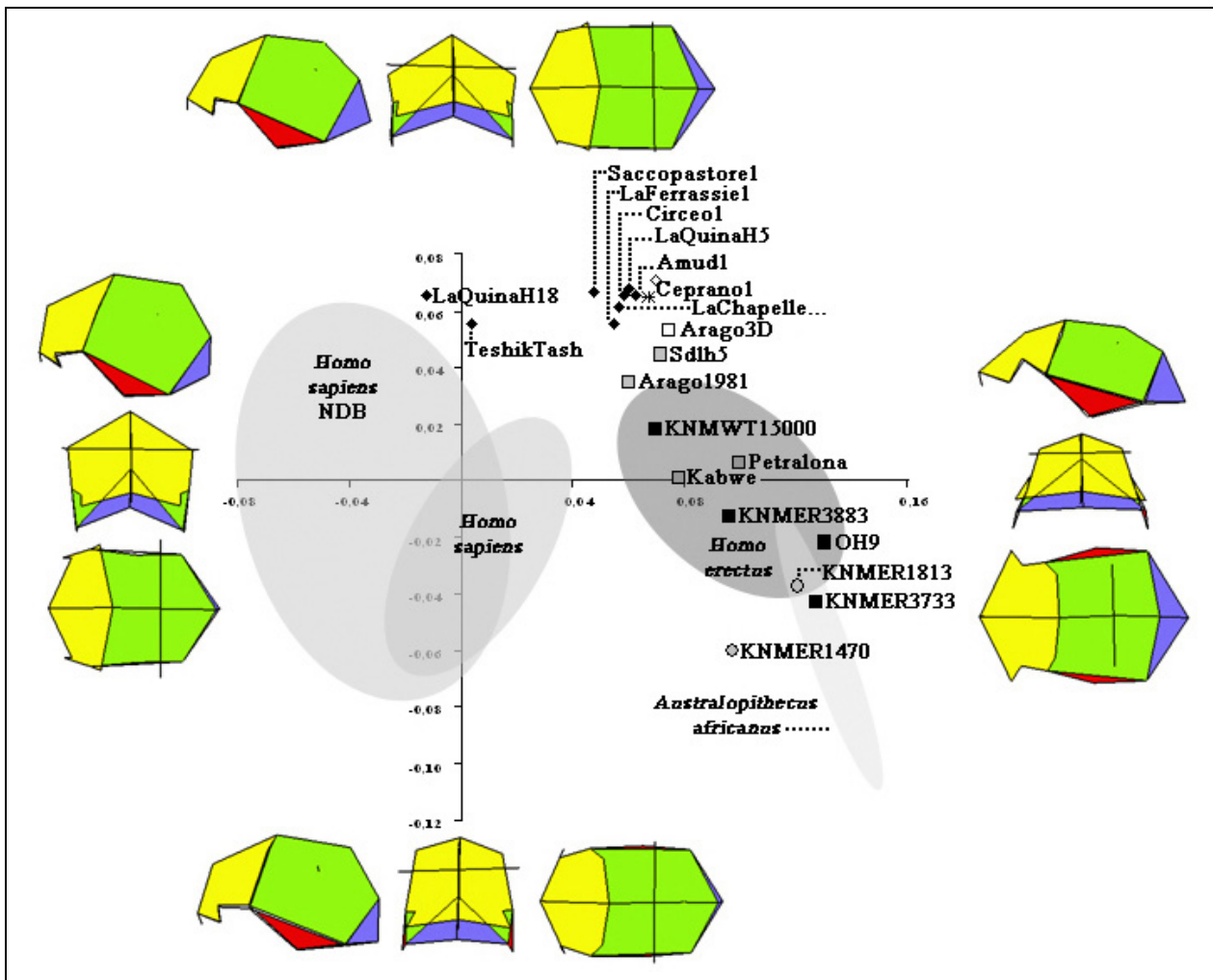
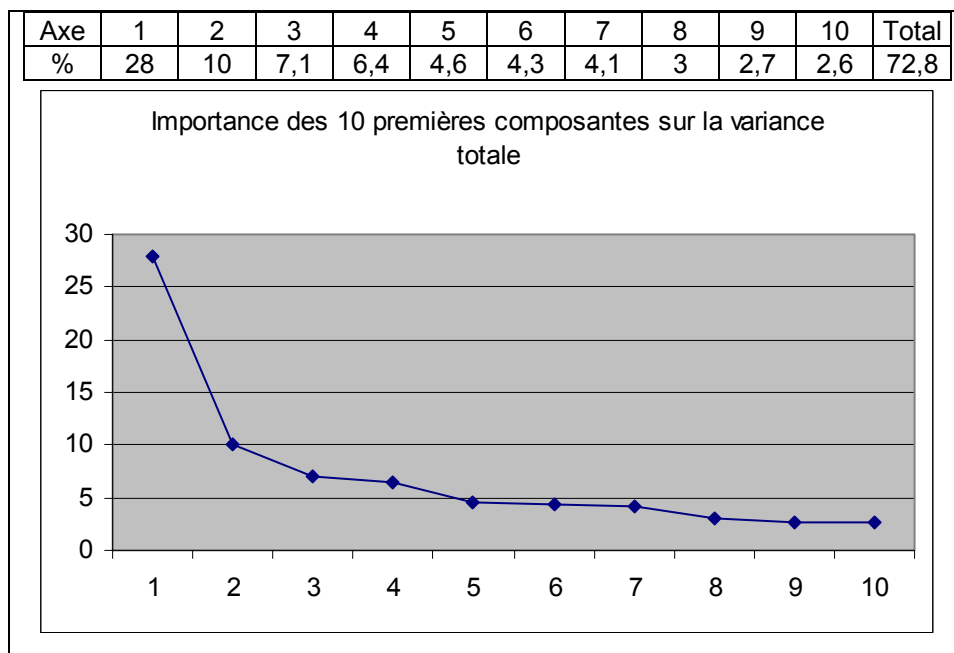


Figure 169 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre *Homo* avec 21 points de repères craniométriques ; Noms des individus - bis.

Le passage des valeurs maximales (La Quina H5) aux valeurs minimales (Sts 5) de l'axe 2 s'effectue par : 1/ Une avancée des bosses pariétales en vue latérale ; 2/ Une hausse des stéphanions en vue frontale ; 3/ Un recul du sagittum et du nasion ; 4/ Une position plus basse pour la glabelle, le lambda et l'opisthocranion. Le porion recule et est plus postérieur.

En vue supérieure la largeur générale de la calotte crânienne diminue dans son ensemble en passant des valeurs positives de l'axe 2 à des valeurs négatives. Ceci s'accompagne d'une plus forte courbure sagittale de la calotte crânienne due à un positionnement inférieur du nasion, de la glabelle, du lambda et de l'opisthocranion. Les nouvelles positions de la glabelle et du lambda entraînent un mouvement des points théoriques métopion (plus postérieur) et sagittum (plus antérieur).



Graphique 9: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre *Homo* avec 21 points de repères craniométriques.

En raison de la similitude des résultats obtenus dans les deux modélisations de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques et étant donné que les effectifs étudiés sont plus grands dans la modélisation à 19 points, nous ne présentons les résultats des comparaisons suivant la méthode des « plaques minces » (Thin-Plates Splines) que pour la modélisation à 19 points.

VII.2.3 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne des espèces du genre *Homo* avec 19 points de repères craniométriques

Le résultat de l'Analyse en Composante Principale réalisée sur les modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne avec 19 points pour le genre *Homo* est présenté en figure 170. Les différents spécimens sont nommés dans les figures 171 et 172.

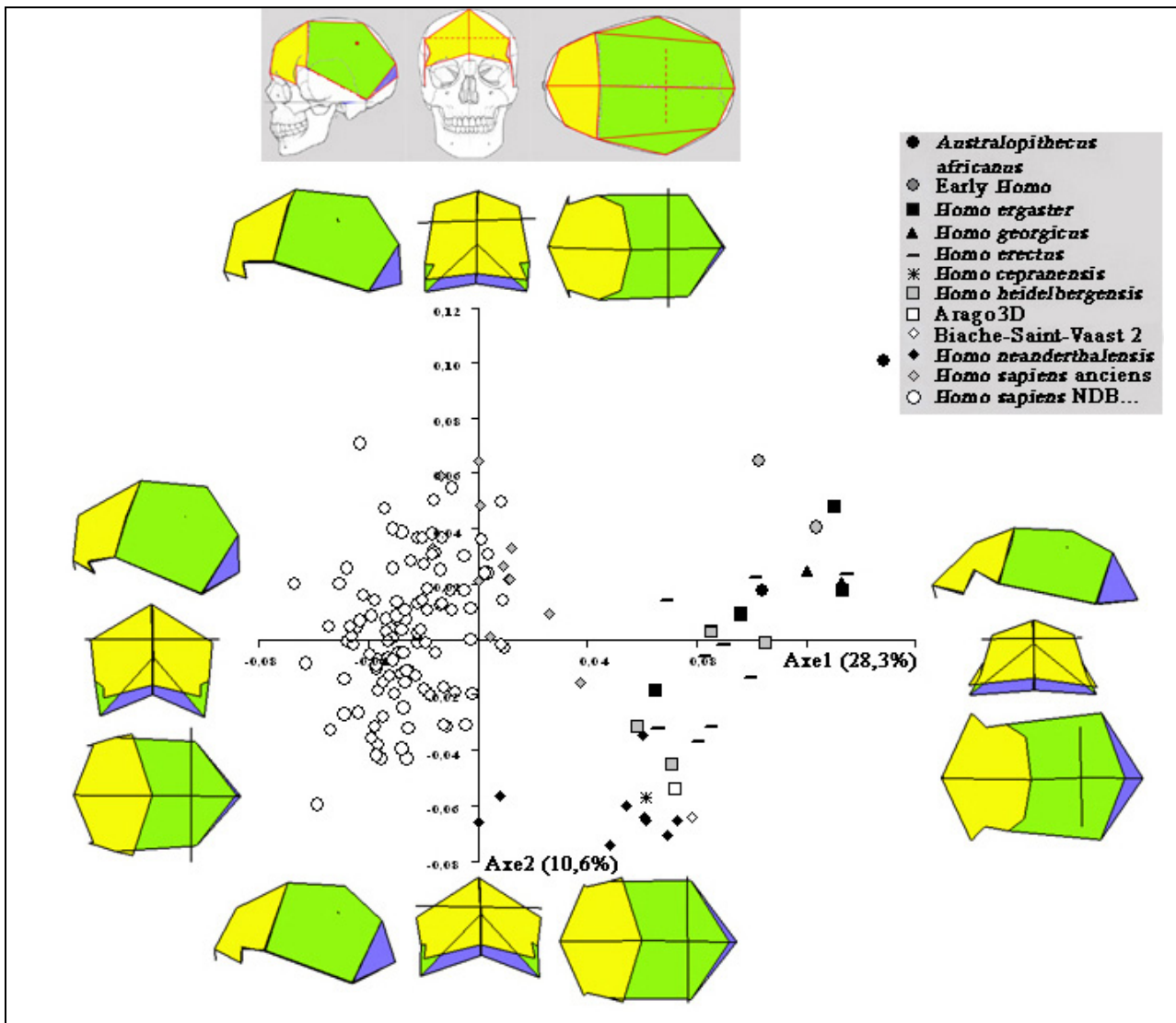


Figure 170 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre *Homo* avec 19 points de repères craniométriques.

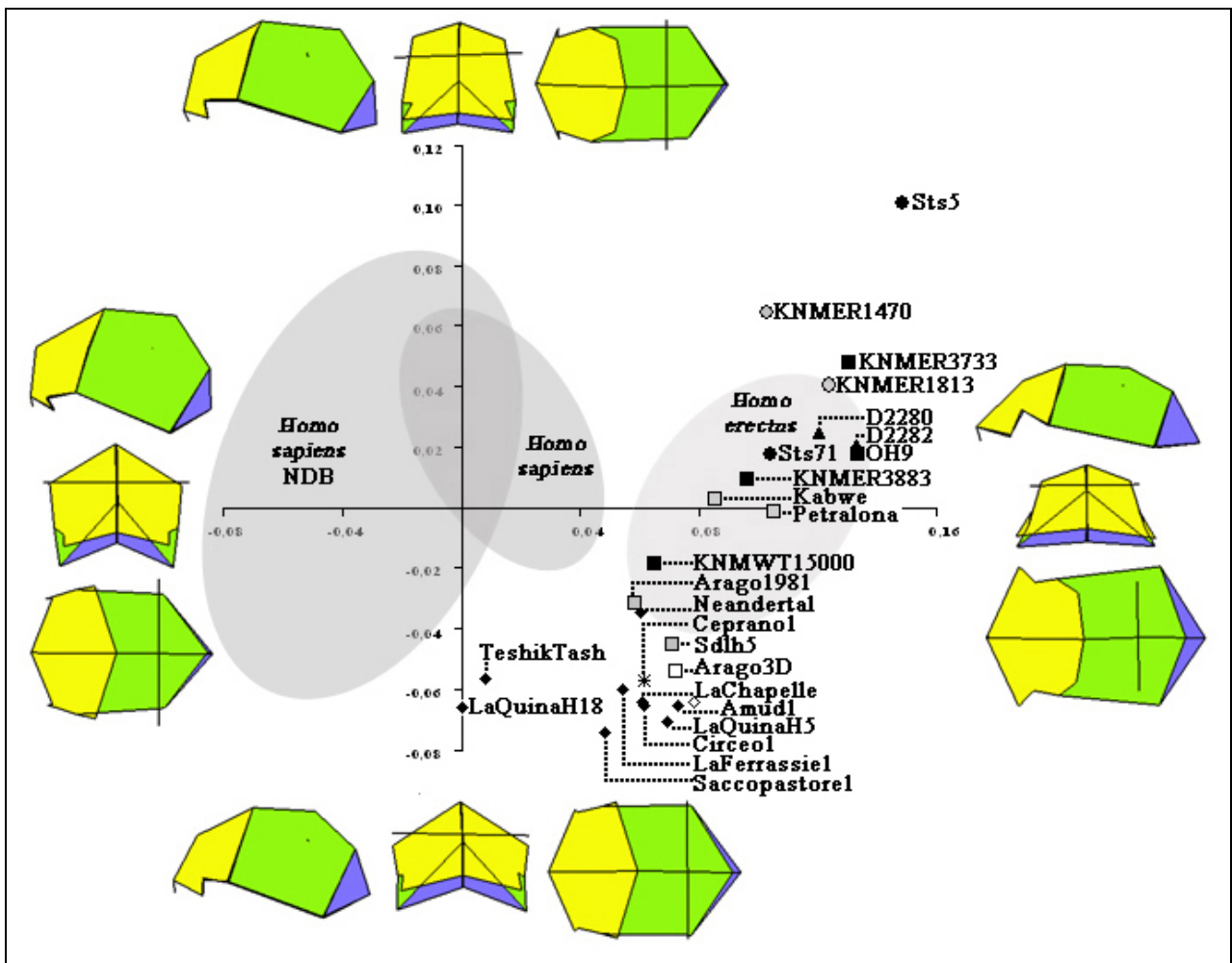
L'axe 1 explique 28,3% de la variance totale des individus étudiés contre 10,6% pour l'axe 2. soit près de 40% (38,9%) de la variance totale pour ces deux axes (graphique 10).

Nous passons de la valeur maximale de l'axe 1 (Sts 5) à sa valeur minimale (*Homo sapiens* historiques) par : 1/ Une réduction de la largeur postérieure inférieure de la calotte crânienne (astérions plus internes, plus avancés et plus bas) ; 2/ L'accroissement de la largeur

antérieure inférieure de la calotte crânienne (sphénions et points fronto-temporaux plus externes) ; 3/ La réduction de la constriction post-orbitaire qui passe de forte à inexistante (diminution de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux et accroissement de la largeur minimale plus antérieure). En parallèle, les largeurs entre les bosses pariétales et les stéphanions augmentent avec un positionnement plus externe de ces points par rapport au plan sagittal.

La combinaison de ces modifications donne une calotte crânienne plus bombée en section frontale en allant des valeurs maximales aux valeurs minimales de l'axe 1.

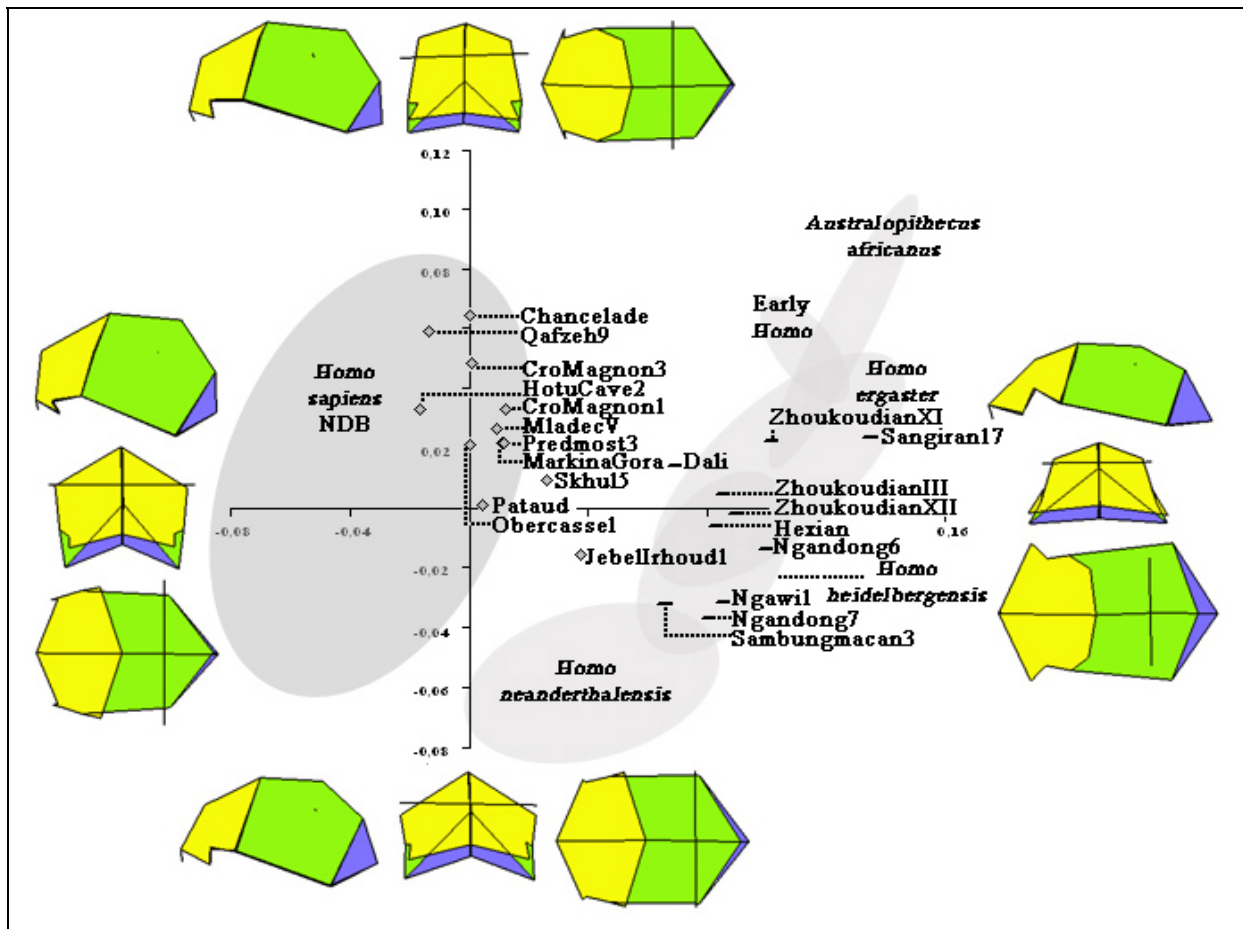
L'opisthocranion devient plus antérieur et passe d'une position postérieure à inférieure sous le lambda. Ceci est accentué par le recul et l'élévation du lambda. Ce mouvement accompagne l'avancée et l'élévation du bregma. L'élévation de ces points de repères correspond à un bombement de la voûte crânienne et entraîne une élévation du sagittum et du métopion.



Au final, en allant des valeurs maximales aux valeurs minimales de l'axe 1, nous passons d'une calotte crânienne sphéroïde à une calotte crânienne de type pentagonoïde en vue supérieure. La calotte crânienne est plus bombée, plus circulaire sagittalement.

Le passage des valeurs maximales (Sts5) aux valeurs minimales (Saccopastore 1) de l'axe 2 correspond à un recul des bosses pariétales en vue latérale, une baisse des stéphanions en vue frontale, un sagittum plus antérieur sur la suture sagittale, une avancée du nasion et une position plus haute pour la glabelle, le lambda et l'opisthocranion.

En vue supérieure la largeur générale de la calotte crânienne s'accroît dans son ensemble en passant des valeurs positives de l'axe 2 à des valeurs négatives. Ceci s'accompagne d'une courbure sagittale de la calotte crânienne moindre du fait du positionnement plus haut du nasion, de la glabelle, du lambda et de l'opisthocranion. Les nouvelles positions de la glabelle et du lambda entraînent un mouvement des points théoriques métopion (plus postérieur) et sagittum (plus antérieur).



Les premiers *Homo* représentés par KNM-ER 1470 (+0,10 ; +0,05) et KNM-ER 1813 (+0,12 ; +0,04) constituent une population plus cohérente que les deux *Australopithecus africanus*.

Les deux *Homo georgicus* présentent des configurations tridimensionnelles de la calotte crânienne similaires à celle de KNM-ER 1813, avec une forme plus curviligne pour D2280 (plus bombée sagittalement et avec une longueur nasion – opisthocranion plus courte) par rapport à celle de D2282*. La largeur biastérique de D2280 est supérieure à celle de D2282* tout comme la largeur entre les points fronto-malaires temporaux. Les stéphanions de D2282* sont moins externes et moins hauts que ceux de D2280.

La forme consensus des *Homo ergaster* est voisine de celle des premiers *Homo* suivant l'axe 1 et se différencie avec une valeur moindre sur l'axe 2, soulignant ainsi une calotte crânienne plus large. La forme consensus est plus proche de celle des *Homo georgicus* avec un même niveau sur l'axe 2 et une valeur inférieure sur l'axe 1 (la forme consensus des *Homo ergaster* a une configuration tridimensionnelle semblable à celle de D2280). Nous n'avons pas pris en compte la configuration tridimensionnelle de KNM-WT 15000, qui présente des valeurs plus faibles pour l'axe 1 et 2, en raison du jeune âge de l'individu. Nous le conservons à titre indicatif.

Les *Homo erectus* sont représentés par dix individus répartis obliquement avec Sangiran 17 comme valeur minimale suivant l'axe 1 et maximale suivant l'axe 2, et Sambungmacan 3 comme valeur minimale pour l'axe 1. La valeur minimale sur l'axe 2 correspond à Ngandong 7. A l'exception de Ngawi 1, Ngandong 7 et Sambungmacan 3 qui présentent des structures tridimensionnelles très proches suivant l'axe 2, il ne semble pas possible de distinguer dans le cadre de l'ACP les *Homo erectus* continentaux de ceux retrouvés en Indonésie.

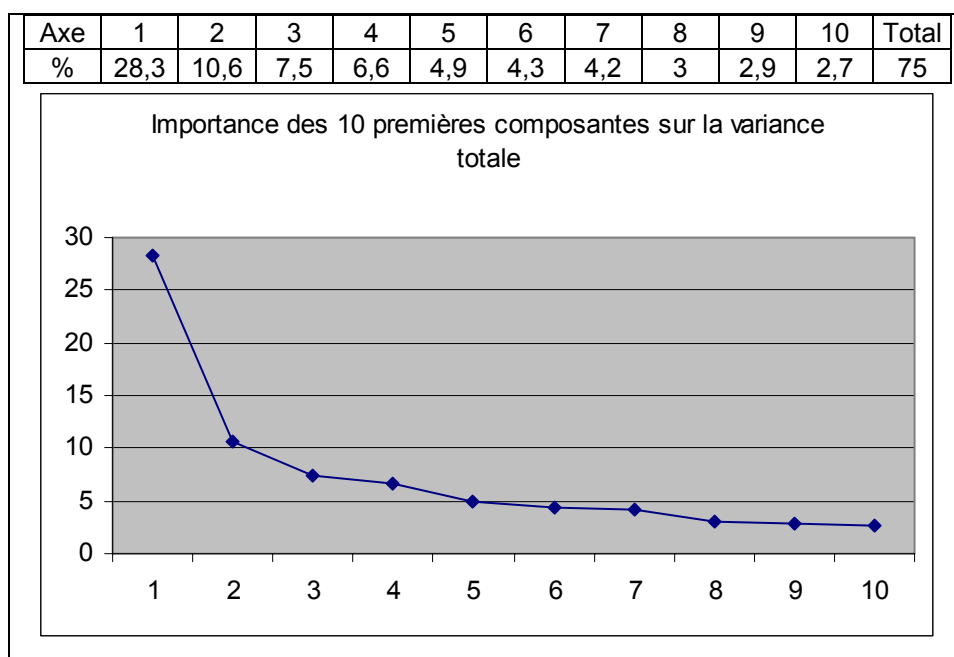
Les quatre *Homo heidelbergensis* étudiés se répartissent en deux groupes avec Petralona et Kabwe pour les valeurs les plus hautes de l'axe 2 et Arago3D et Sima de los Huesos 5 pour les valeurs les plus basses suivant l'axe 2. Nous considérons ces deux populations séparément.

Notre proposition de reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2 est éloignée suivant l'axe 2 du groupe des *Homo heidelbergensis* Petralona et Kabwe. La calotte crânienne de ce spécimen est semblable à celle d'Amud 1 et de notre reconstruction d'Arago.

La modélisation tridimensionnelle de Ceprano 1 présente une valeur similaire au groupe Arago3D et Sima de los Huesos 5 sur l'axe 1 et diffère par une valeur inférieure sur l'axe 2 (calotte crânienne plus large). Ceprano 1 correspond presque à la forme consensus des

Néandertaliens. Ceux-ci constituent l'extrémité inférieure de l'axe 2 (de -0,08 pour Saccopastore 1 à -0,04 pour Neandertal). Les adultes sont concentrés sur l'axe 1 entre les valeurs +0,05 et +0,07 et constituent une population homogène. Les formes juvéniles présentent un positionnement différent sur l'axe 1, avec des valeurs correspondant aux *Homo sapiens* préhistoriques et historiques. La calotte crânienne de ces jeunes individus est plus courbée sagittalement que celle des Néandertaliens adultes, mais tout aussi large (qu'eux), différant en cela des *Homo sapiens*.

A l'exception de Jebel Irhoud 1 très distant (valeur supérieure) et de Skhul 5 moins distant sur l'axe 1, tous les *Homo sapiens* préhistoriques présentent des configurations tridimensionnelles de la calotte crânienne identiques à celles d'individus historiques. A l'exception de ces deux spécimens, la population préhistorique est assez homogène tout comme la population historique. Cette population historique s'étire préférentiellement suivant l'axe 2 (-0,06 à +0,07) contre un axe 1 moins dispersé (-0,07 à +0,01).



Graphique 10: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre *Homo* avec 19 points craniométriques.

En raison de la proximité conformationnelle des formes consensus des *Homo ergaster* et des *Homo georgicus*, nous ne présentons que les résultats des comparaisons entre les *Homo ergaster* et les autres Hominidés fossiles. Nous précisons que la forme consensus correspondant à D2280 et D2282 est légèrement moins curviligne sagittalement (distance nasion – prosthion supérieure en proportion) et plus large au niveau des largeurs inférieures bilatérales (biastérique, bi-FMT) avec une constriction post-orbitaire plus marquée.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des premiers *Homo* et des *Homo ergaster*

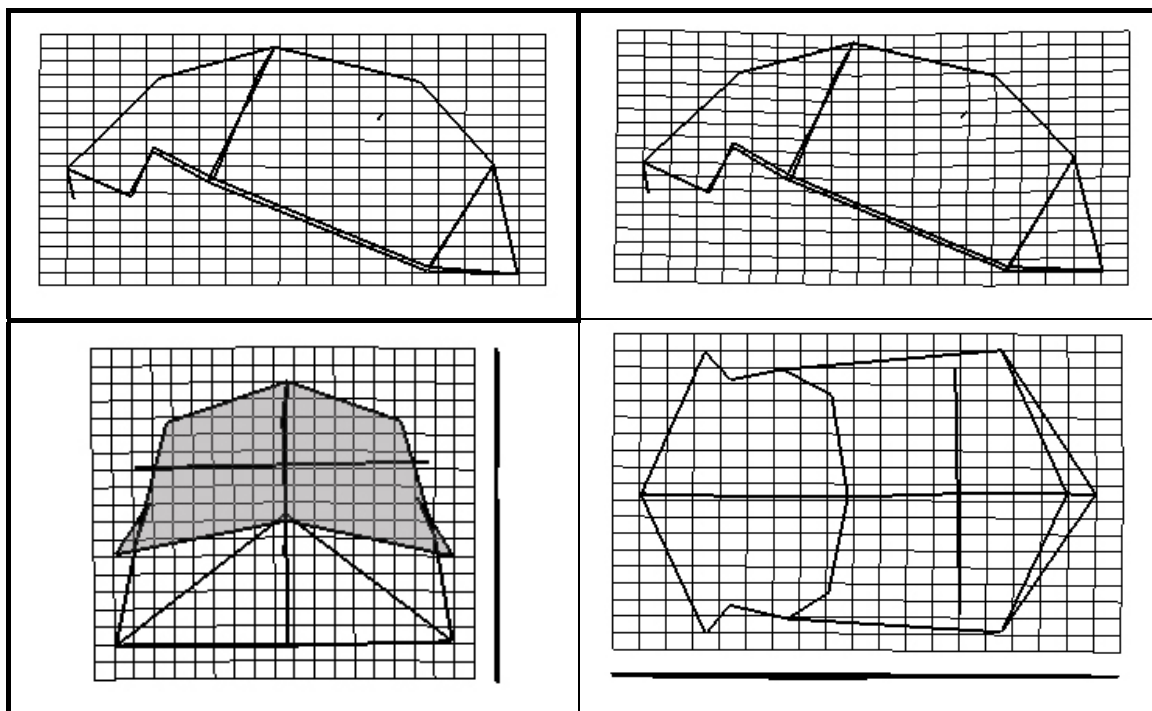


Figure 173 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* en TPS.

La calotte crânienne des premiers *Homo* étudiés est allongée antéro-postérieurement et présente un contour divergent postérieurement depuis la constriction post-orbitaire marquée. L'os frontal est fuyant. La base de la calotte crânienne (largeurs bisphénique et biastérique) est plus large que la portion supérieure (largeurs bistéphanique et bi-bosses pariétales).

La forme consensus des *Homo ergaster* est proche de celle des premiers *Homo* suivant l'axe 1 et se différencie avec une valeur moindre sur l'axe 2 (figure 173), ce qui correspond à une calotte crânienne plus large, notamment au niveau de la constriction post-orbitaire. Les points fronto-temporaux sont plus situés à l'extérieur chez les *Homo ergaster* ce qui réduit la

constriction. La largeur bisphénique s'accroît tout comme la largeur entre les stéphanions (inférieurs).

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des premiers *Homo* et des *Homo erectus*

La forme consensus des *Homo erectus* présente une voûte sagittale plus bombée que celle des premiers *Homo* du fait de sagittum, bregma, métopion plus hauts (figure 174). La longueur générale de la calotte crânienne diminue et s'accompagne d'un recul relatif des bosses pariétales (projection horizontale).

Les astérions sont antérieurs et plus bas. En projection sagittale, le triangle astérion – lambda – opisthocranion est de plus en plus isocèle. La largeur antérieure de la calotte crânienne augmente avec une réduction de la constriction post-orbitaire (accroissement de la largeur entre les points fronto-temporaux) et un positionnement plus externe des sphénions et stéphanions.

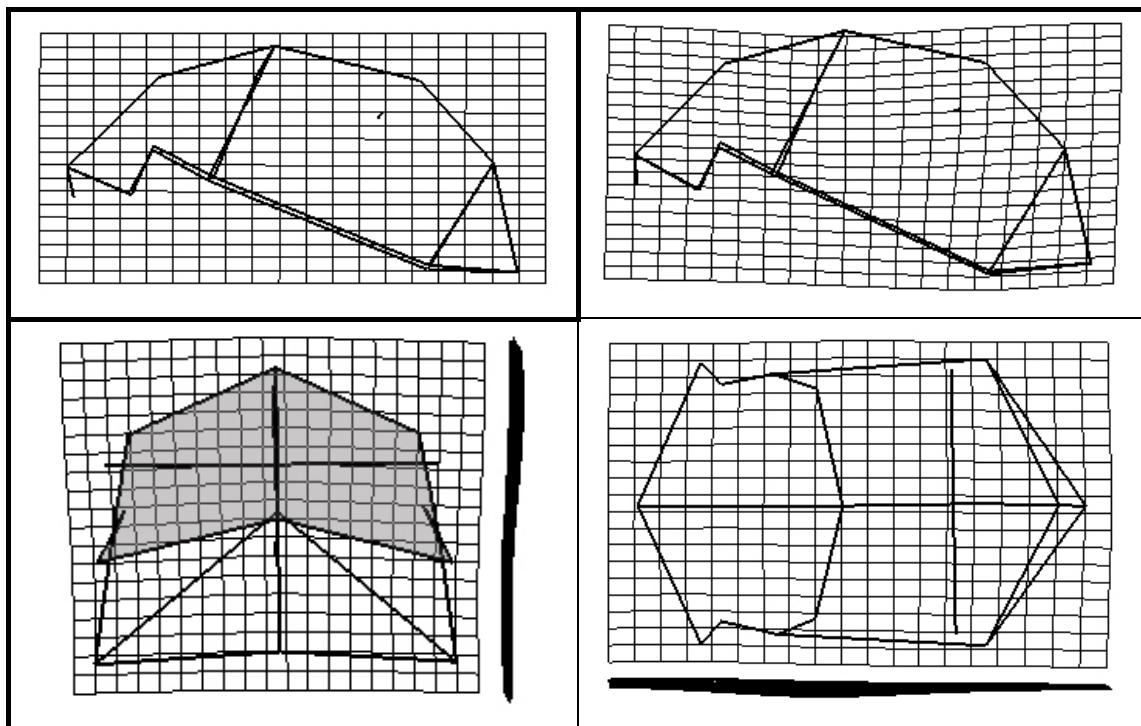


Figure 174 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers *Homo* et des *Homo erectus* en TPS.

**Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne
des premiers *Homo* et d'*Homo cepranensis***

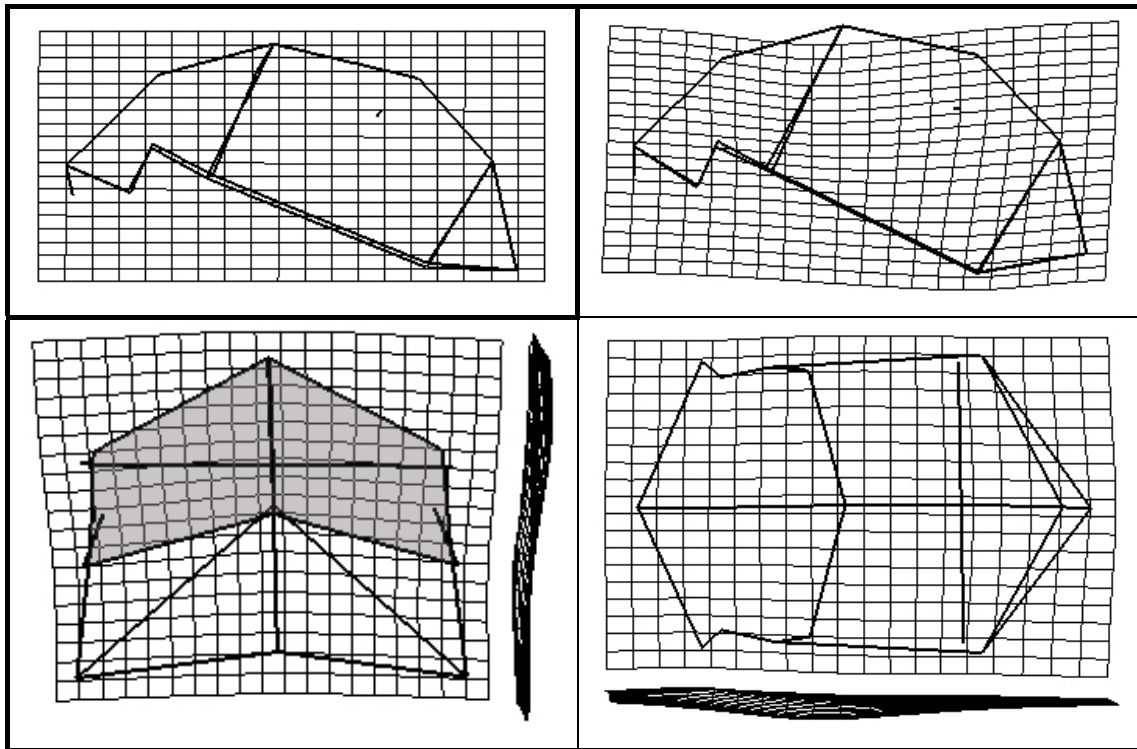


Figure 175 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers *Homo* et d'*Homo cepranensis* en TPS.

La modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne de Ceprano 1 présente le même type de différences que celles entre les premiers *Homo* et les *Homo erectus* mais ces différences sont plus accentuées (figure 175) en raison d'une position plus basse de Ceprano 1 sur l'axe 1 et 2 par rapport à la forme consensus des *Homo erectus*.

**Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne
des premiers *Homo* et d'Arago3D-Sdlh5**

La forme consensus des modélisations tridimensionnelles d'Arago3D et de Sima de los Huesos 5 présente le même type de différences que celles entre les premiers *Homo* et les *Homo erectus*. Ces différences sont cependant plus marquées (figure 176) en raison d'une position plus basse des *Homo heidelbergensis* sur l'axe 1 et 2 par rapport à la forme consensus des *Homo erectus*. Les différences sont toutefois légèrement moins marquées qu'entre les premiers *Homo* et Ceprano 1.

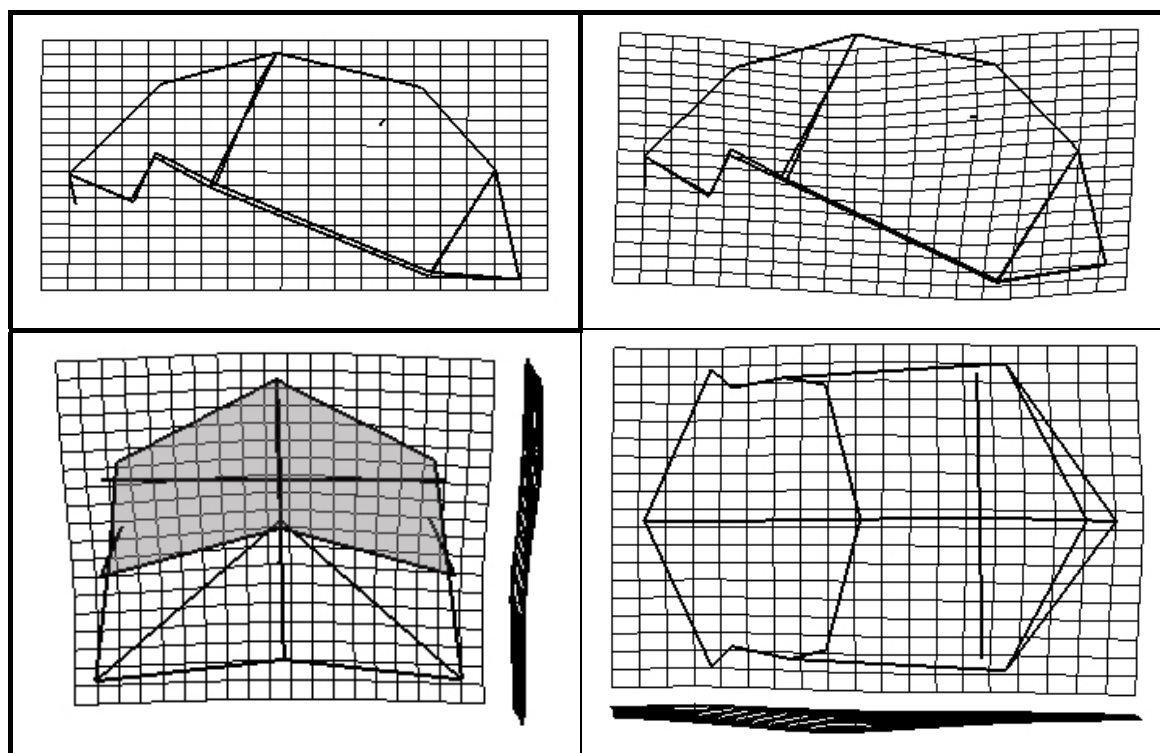


Figure 176 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers *Homo* et d'Arago3D-Sdlh5 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des premiers *Homo* et de Petralona-Kabwe

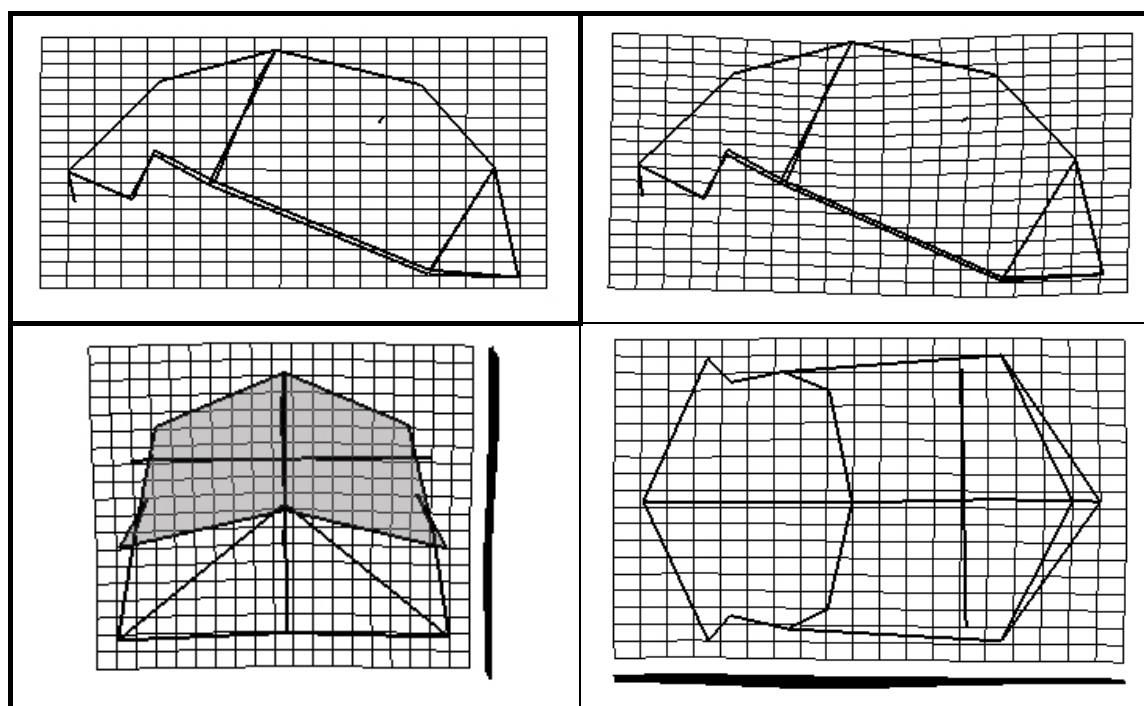


Figure 177 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers *Homo* et de Petralona-Kabwe en TPS.

Les différences morphologiques entre les premiers *Homo* et le groupe Petralona – Kabwe (figure 177) sont peu marquées suivant l'axe 1 et dépendent surtout de l'axe 2. Les astérions sont légèrement antérieurs par rapport à ceux des premiers *Homo*. Alors que la calotte crânienne apparaît légèrement plus curviligne, la différence est observable au niveau de la constriction post-orbitaire moins importante chez les deux *Homo heidelbergensis*.

Les stéphanions sont plus externes chez ces deux spécimens.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo ergaster* et d'*Homo cepranensis*

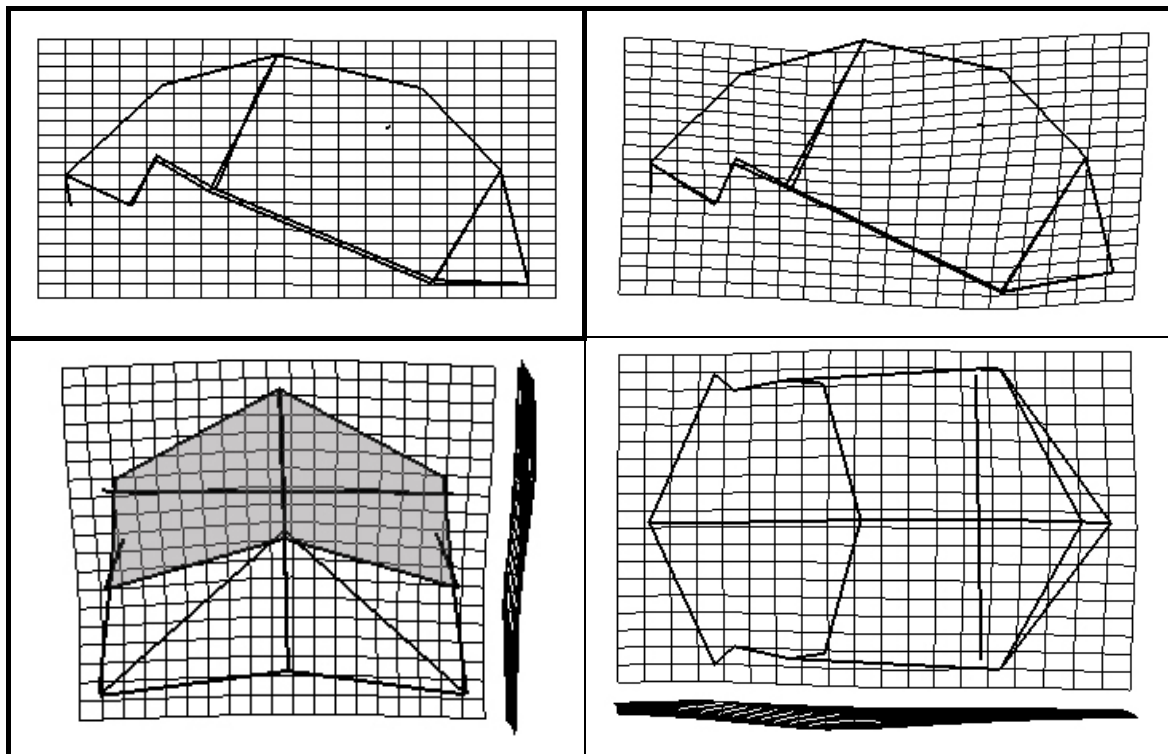


Figure 178 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de *Homo ergaster* et d'*Homo cepranensis* en TPS.

Les formes consensus de ces deux espèces présentent des morphologies tridimensionnelles différentes avec une calotte crânienne plus bombée pour Ceprano 1 (figure 178) liée à : 1/ Une élévation des sagittum, bregma, métopion ; 2/ Une avancée de l'opisthocranion ; 3/ Un recul de la glabellle. La constriction post-orbitaire est moindre avec une largeur entre les points fronto-temporaux représentant près de 5/6^{ème} de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux. L'avancée de l'astérion contribue à augmenter l'épaisseur de la calotte crânienne en projection sagittale.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne d'*Homo ergaster* et d'Arago3D-Sdlh5

Comme nous l'avons précédemment indiqué, la modélisation consensus correspondant au groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 (figure 179) est semblable à celle de Ceprano 1, avec toutefois une valeur supérieure sur l'axe 1 et sur l'axe 2. Les différences de conformations tridimensionnelles avec les *Homo ergaster* sont du même type mais moins marquées.

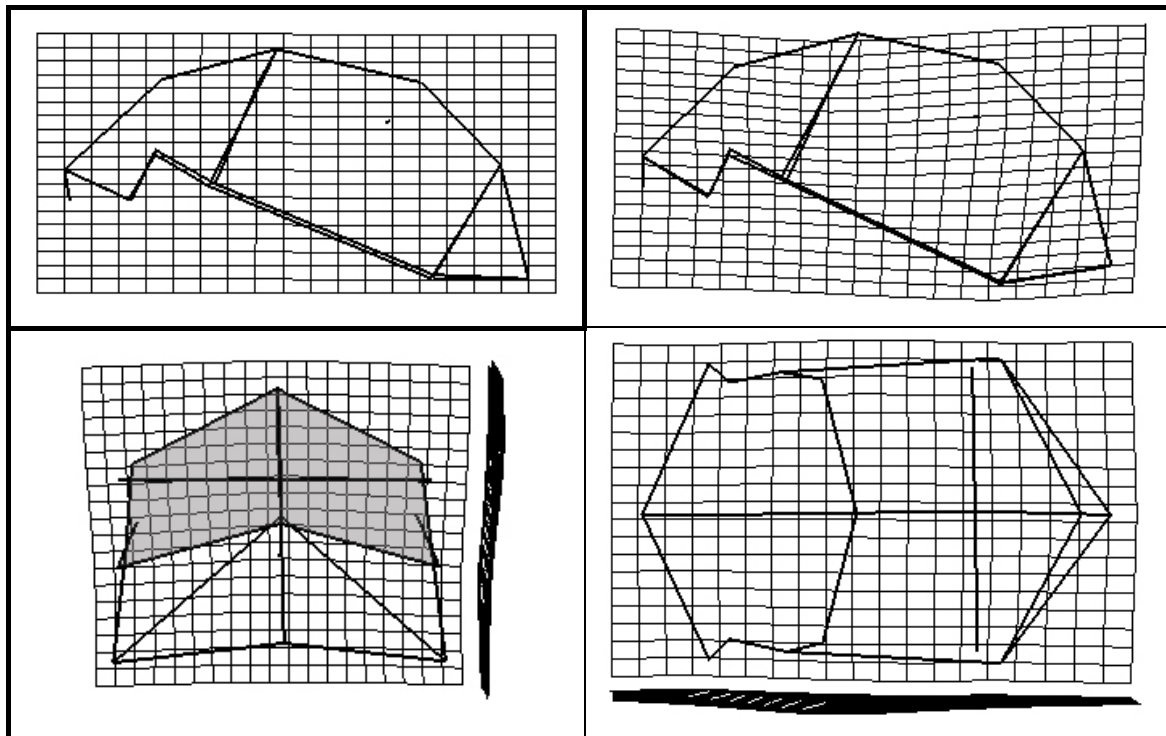


Figure 179 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de *Homo ergaster* et d'Arago3D-Sdlh5 en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo ergaster* et de Petralona-Kabwe

Les différences morphologiques entre les *Homo ergaster* et le groupe Petralona – Kabwe (figure 180) sont peu marquées suivant l'axe 1 et dépendent surtout de l'axe 2. La calotte crânienne est plus courbée pour les *Homo heidelbergensis* (figure 180) en raison de l'élévation du sagittum, bregma, métopion et d'une constriction post-orbitaire moindre. La distance glabella – opisthocranion se réduit.

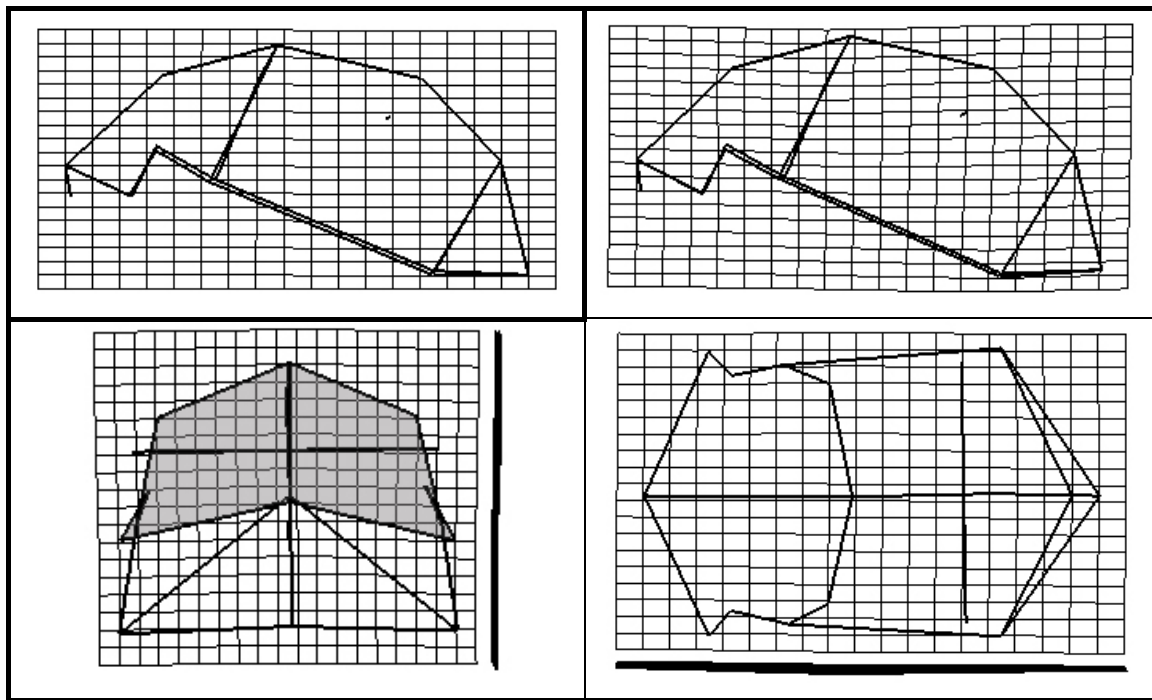


Figure 180 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des *Homo ergaster* et de Petralona-Kabwe en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo ergaster* et des *Homo erectus*

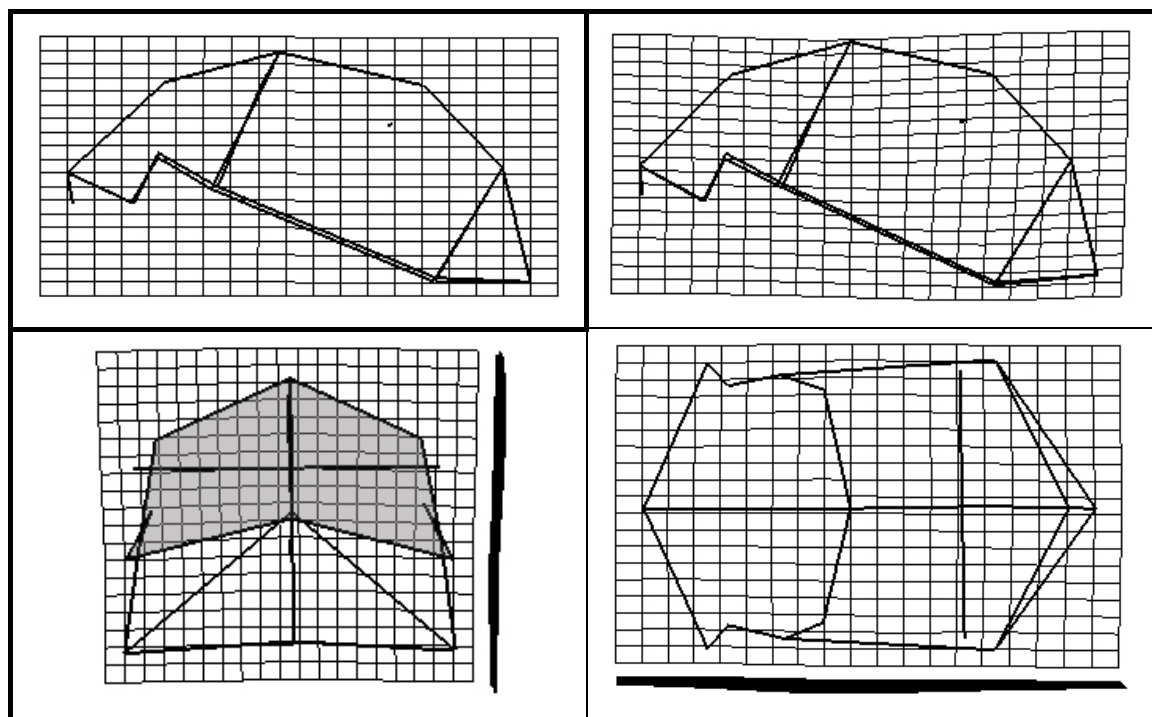


Figure 181 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des *Homo ergaster* et des *Homo erectus* en TPS.

Les différences observées entre les *Homo erectus* et les *Homo ergaster* (figure 181) sont intermédiaires entre celles constatées lors de la comparaison *Homo ergaster* – Petralona – Kabwe et lors de la comparaison *Homo ergaster* – Arago – Sima de los Huesos 5.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo ergaster* et des *Homo sapiens* préhistoriques

La comparaison entre les *Homo ergaster* et les *Homo sapiens* préhistoriques (figure 182) diffère fortement des précédentes réalisées avec les *Homo ergaster* (groupes distants sur l'axe 1).

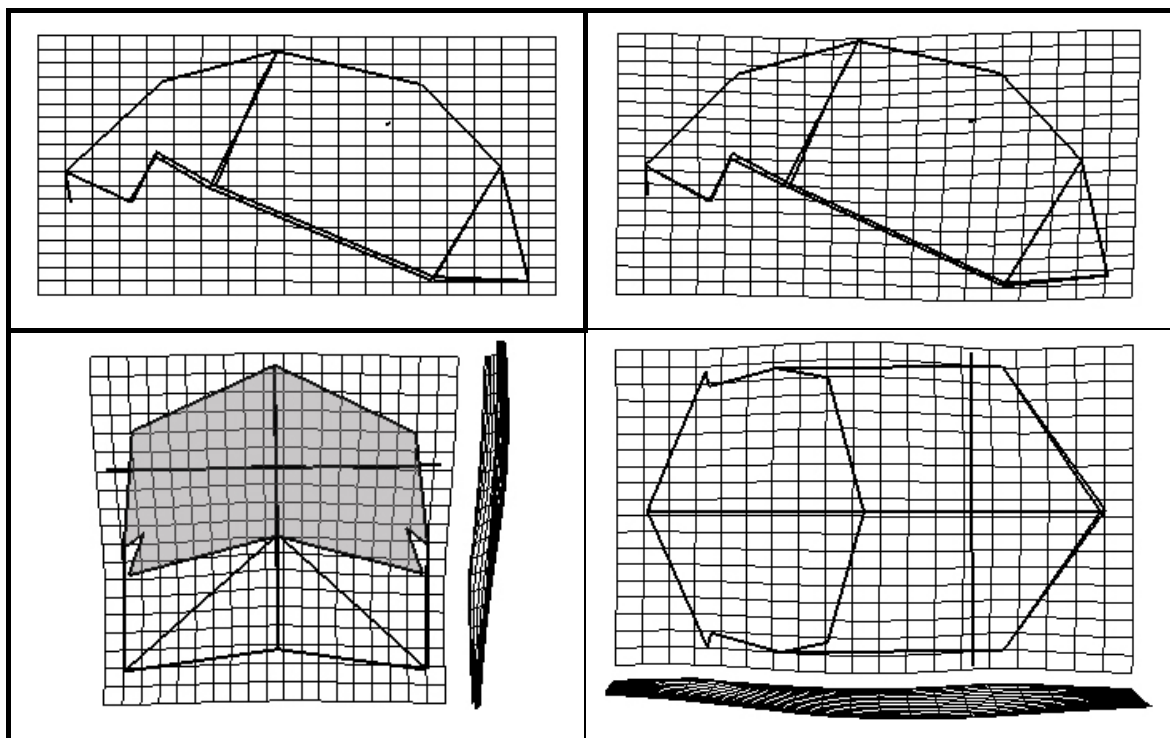


Figure 182 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des *Homo ergaster* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Le contour sagittal de la calotte crânienne est plus curviligne (tendance à la brachycéphalie) du fait : 1/ D'un positionnement supérieur du métopion (plus antérieur), du bregma et du sagittum ; 2/ D'un recul de la glabellle ; 3/ D'un opisthocranion plus antérieur. L'astérion des *Homo sapiens* préhistoriques subit un triple mouvement par rapport à celui de l'*Homo ergaster* : il devient antérieur, inférieur et est situé plus proche du plan sagittal. Cette réduction de la largeur biastérique s'accompagne d'un point fronto-malaire temporal plus externe. En vue supérieure la calotte crânienne est presque rectangulaire (sans tenir compte de

l'opisthocranion et de la glabell) avec une constriction post-orbitaire faible tandis que les points fronto-temporaux et les sphénions ne changent pas de position. Les stéphanions sont plus haut et plus écartés du plan sagittal. Les bosses temporales dépassent le tracé de la suture pariéto-temporale en vue supérieure. En vue frontale la calotte crânienne présente des bords presque verticaux (segments sphénion – astérion).

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques

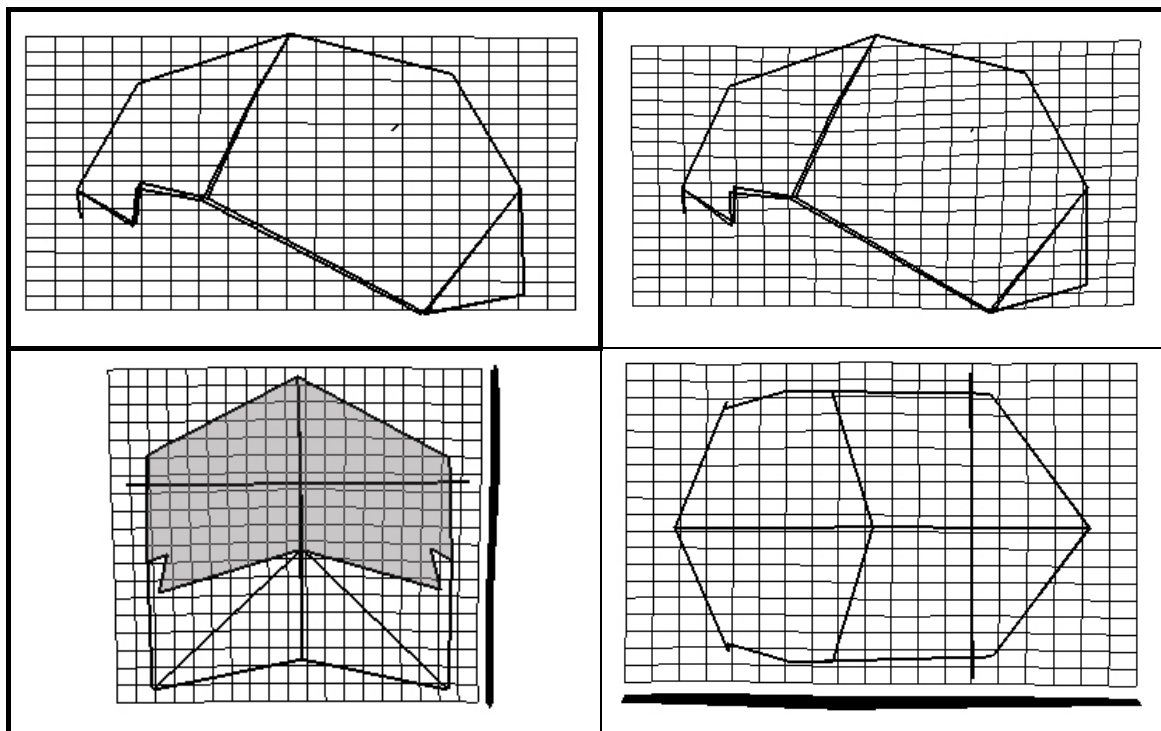


Figure 183 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de *Homo sapiens* préhistoriques et historiques en TPS.

Les formes historiques (figure 183) diffèrent peu des formes préhistoriques, avec une calotte crânienne courbée sagittalement (tendance à la brachycéphalie) et une constriction post-orbitaire plus faible chez les individus historiques. En vue frontale la calotte crânienne des spécimens historiques présente un contour pentagonal.

Le passage des individus préhistoriques à ceux historiques ne correspondant qu'à une accentuation des caractères de la population plus ancienne, nous conserverons celle-ci comme référence pour la comparaison des individus fossiles avec les *Homo sapiens*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis*

La forme consensus de la calotte crânienne des Néandertaliens est comparable à celle de Ceprano 1 (figure 184), mais avec une calotte crânienne légèrement plus courbée, plus courte et une constriction post-orbitaire moindre.

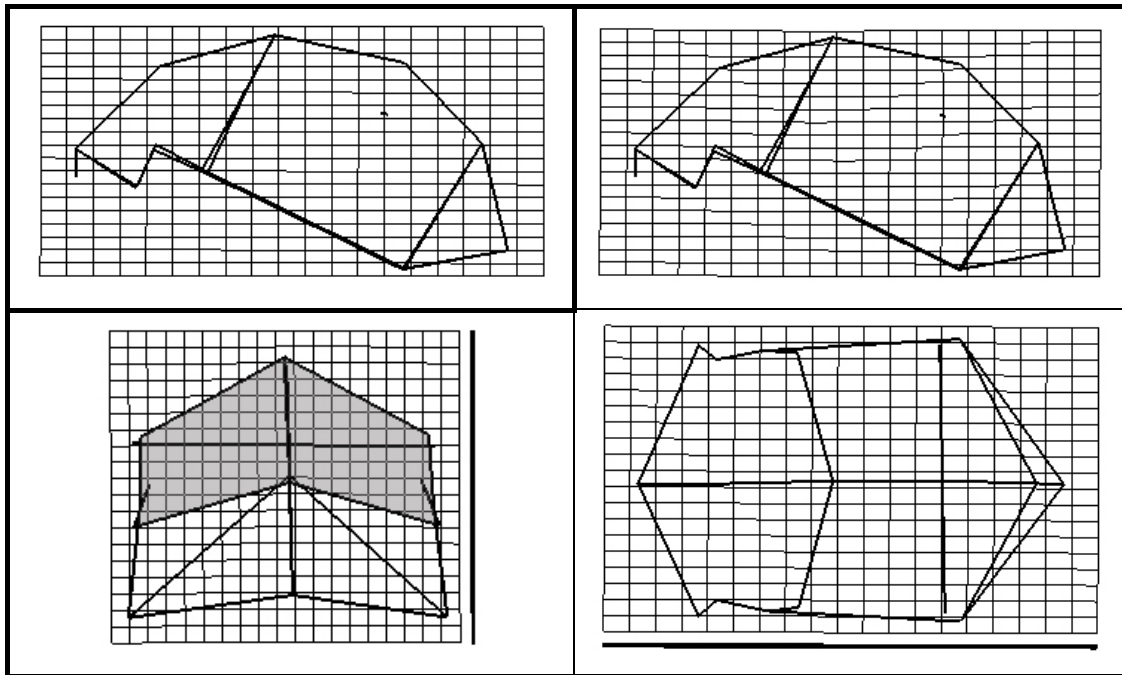


Figure 184 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de *Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne d'Arago3D-Sdlh5 et de Petralona-Kabwe

Les deux groupes d'*Homo heidelbergensis* ont une courbure différente de la calotte crânienne (figure 185), celle-ci étant plus courbée sagittalement pour le groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 (sagittum, bregma et métopion plus hauts, longueur glabell – opisthocranion réduite). Les grilles de déformations sont curvilignes pour le groupe Petralona – Kabwe par rapport à la référence. Ceci correspond à un positionnement plus haut et plus interne (visible en vue frontale) du stéphanion pour ce groupe par rapport à Arago3D – Sima de los Huesos 5. La forme consensus de Petralona – Kabwe a un astérion plus haut et plus postérieur (courbure inférieure de la grille). Petralona – Kabwe ont un sphénion et un point fronto-temporal plus interne et un point fronto-malaire temporal plus externe (constriction post-orbitaire plus importante).

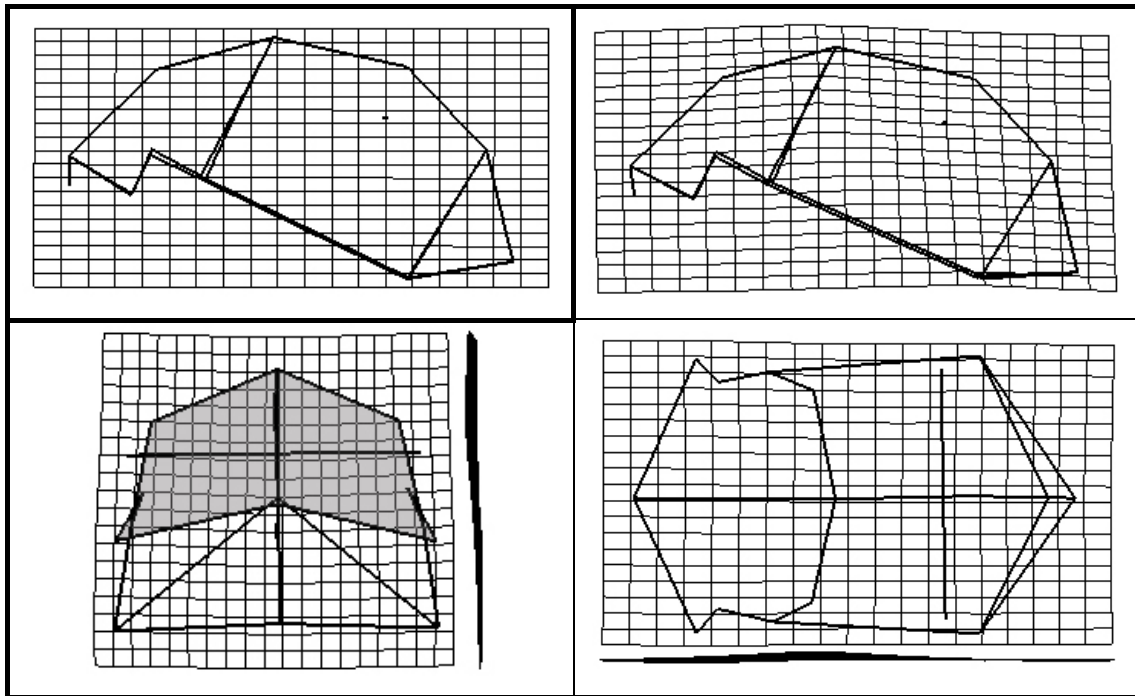


Figure 185 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et de Petralona-Kabwe en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne d'Arago3D-Sdlh5 et des *Homo erectus*

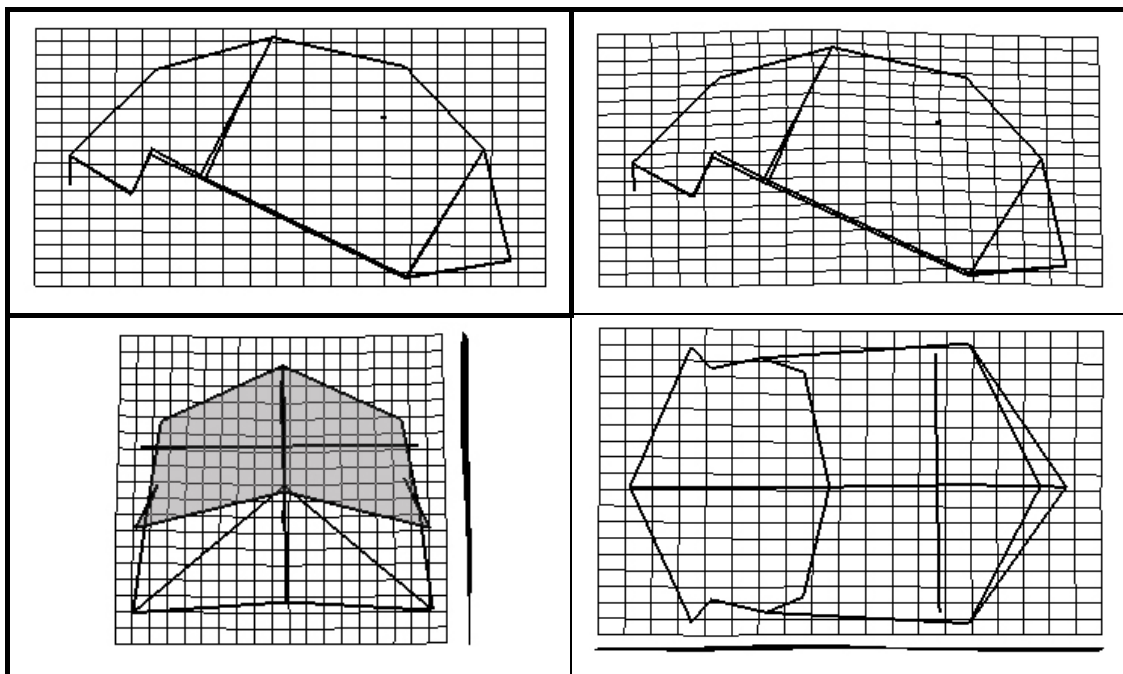


Figure 186 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et des *Homo erectus* en TPS.

Nous constatons le même type de différences entre le groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 et la forme consensus des *Homo erectus* (figure 186) qu’entre les deux groupes d’*Homo heidelbergensis*, mais ces divergences sont moins marquées. La forme consensus correspondant à Arago3D et à Sima de los Huesos 5 est plus courbée sagittalement et présente une plus grande largeur entre les bosses pariétales et entre les stéphanions.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne d’Arago3D-Sdlh5 et des *Homo neanderthalensis*

La conformation tridimensionnelle de ces deux *Homo heidelbergensis* est semblable à celle des Néandertaliens (figure 187). Les grilles de déformation permettent de constater quelques variations, avec une voûte plus courbée et des stéphanions plus externes et plus bas pour les Néandertaliens.

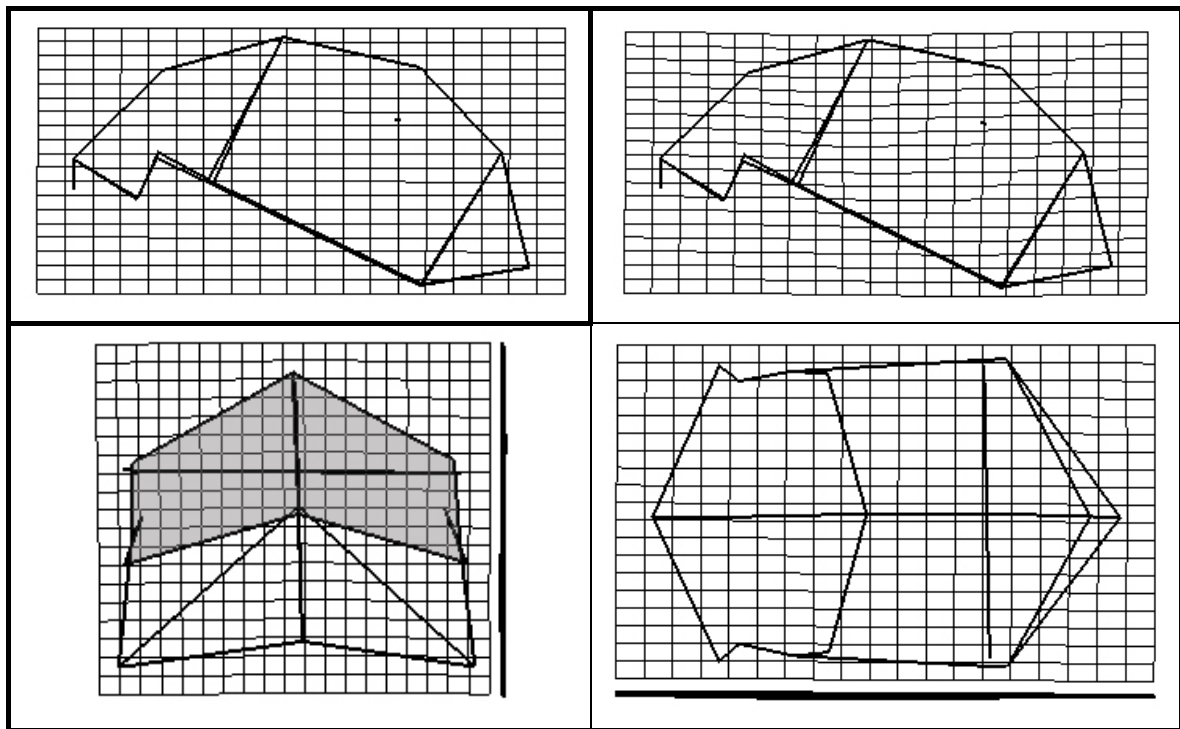


Figure 187 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

**Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne
d'Arago3D-Sdlh5 et des *Homo sapiens* préhistoriques**

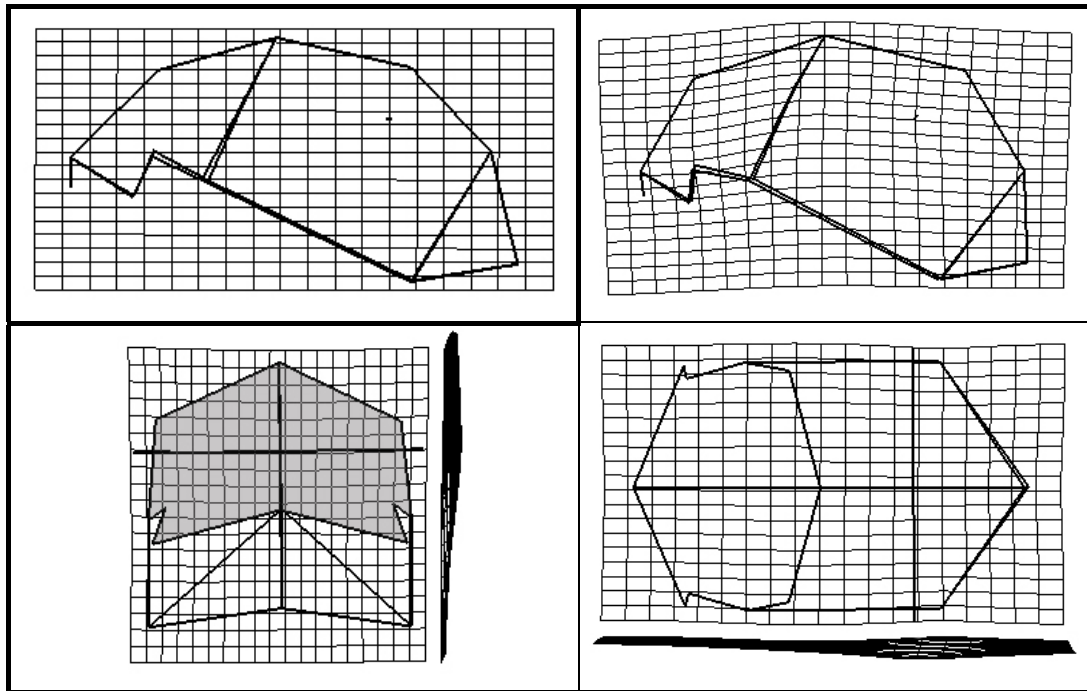


Figure 188 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Les différences entre ces deux *Homo heidelbergensis* et les *Homo sapiens* préhistoriques (figure 188) sont nombreuses. Le contour sagittal de la calotte crânienne est plus curviligne pour les *Homo sapiens* préhistoriques (métopion plus antérieur et plus haut, bregma et sagittum plus hauts, distance glabellé – opisthocranion moindre ; tendance à la brachycéphalie). Leurs astérions sont antérieurs, plus bas et plus proches du plan sagittal. Ceci entraîne la réduction de la largeur biastérique et de l'angle astérion – lambda – astérion. Antérieurement, le point fronto-malaire temporal est plus externe. La calotte crânienne n'est plus divergente en vue supérieure par rapport aux deux *Homo heidelbergensis*. Les stéphanions sont situés plus haut et sont plus écartés du plan sagittal. Les bosses temporales dépassent le tracé de la suture pariéto-temporale en vue supérieure. En vue frontale la calotte crânienne présente des bords presque verticaux (segments sphénion – astérion).

**Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne
de Petralona-Kabwe et des *Homo erectus***

La conformation tridimensionnelle de ces deux *Homo heidelbergensis* est comparable à celle des *Homo erectus* étudiés (figure 189), mais légèrement moins courbée sagittalement.

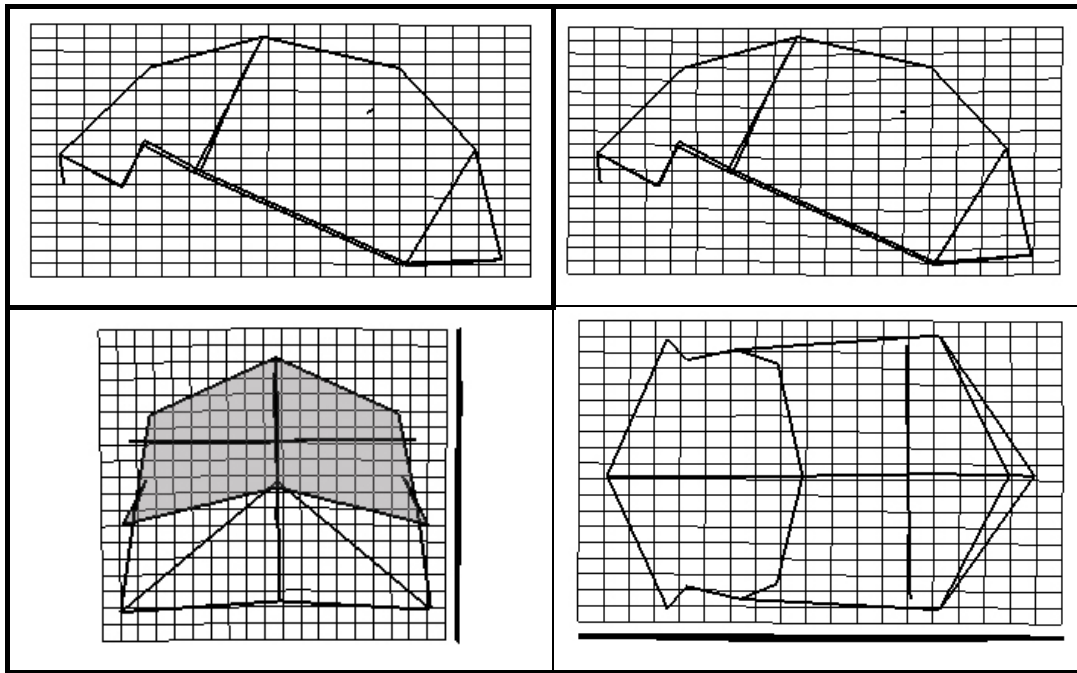


Figure 189 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Petralona-Kabwe et des *Homo erectus* en TPS.

En raison de la grande proximité *Homo cepranensis* – *Homo neanderthalensis* sur l'ACP réalisée, nous ne présentons pas de comparaison Petralona – Kabwe avec Ceprano 1, les résultats étant similaires à ceux qui suivent. Pour la même raison, nous n'avons pas présenté de comparaison de Petralona – Kabwe avec Arago – Sima de los Huesos 5.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne de Petralona-Kabwe et des *Homo neanderthalensis*

Ce groupe d'*Homo heidelbergensis* est différent des Néandertaliens. Les *Homo heidelbergensis* ont une courbure sagittale moindre (figure 190). Les Néandertaliens ont un sagittum, un bregma et un métopion plus hauts, avec une longueur glabell – opisthocranion plus courte. La calotte crânienne des Néandertaliens a un aspect plus globuleux. Le stéphanion des Néandertaliens est plus externe et plus bas (grille frontale évasée). La forme consensus des *Homo neanderthalensis* a un astérion plus bas et plus antérieur que celui des deux *Homo heidelbergensis* (courbure inférieure de la grille). La constriction post-orbitaire des Néandertaliens est moindre.

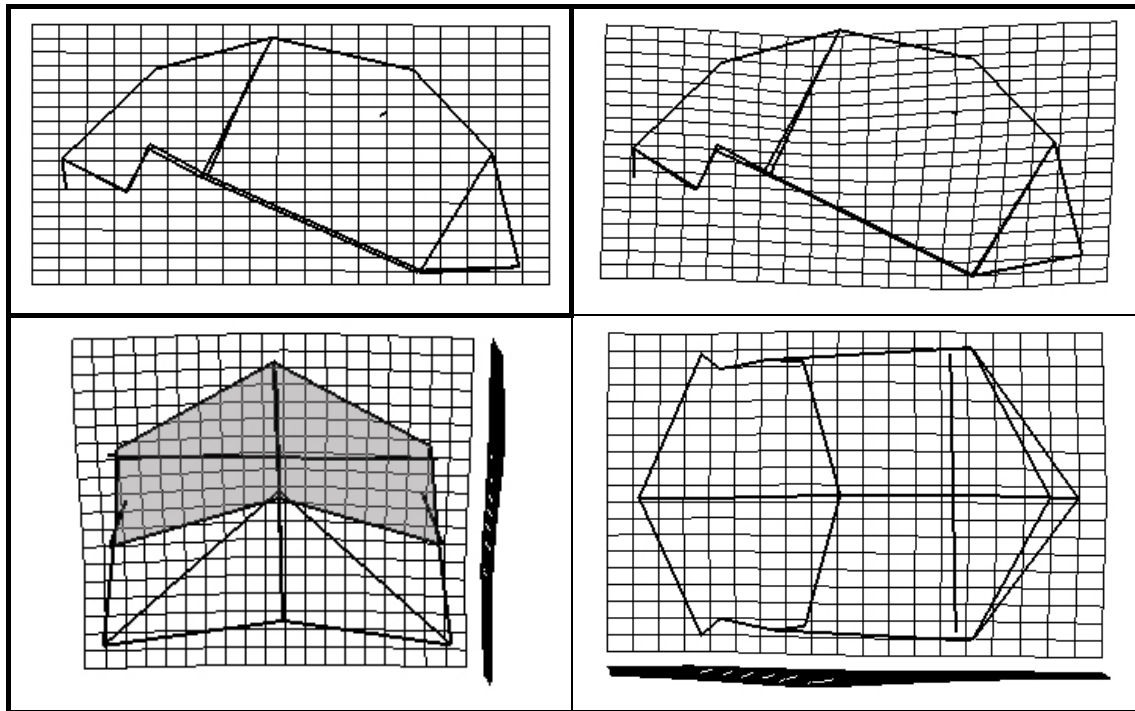


Figure 190 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Petralona-Kabwe et des Néandertaliens en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne de Petralona-Kabwe et des *Homo sapiens* préhistoriques

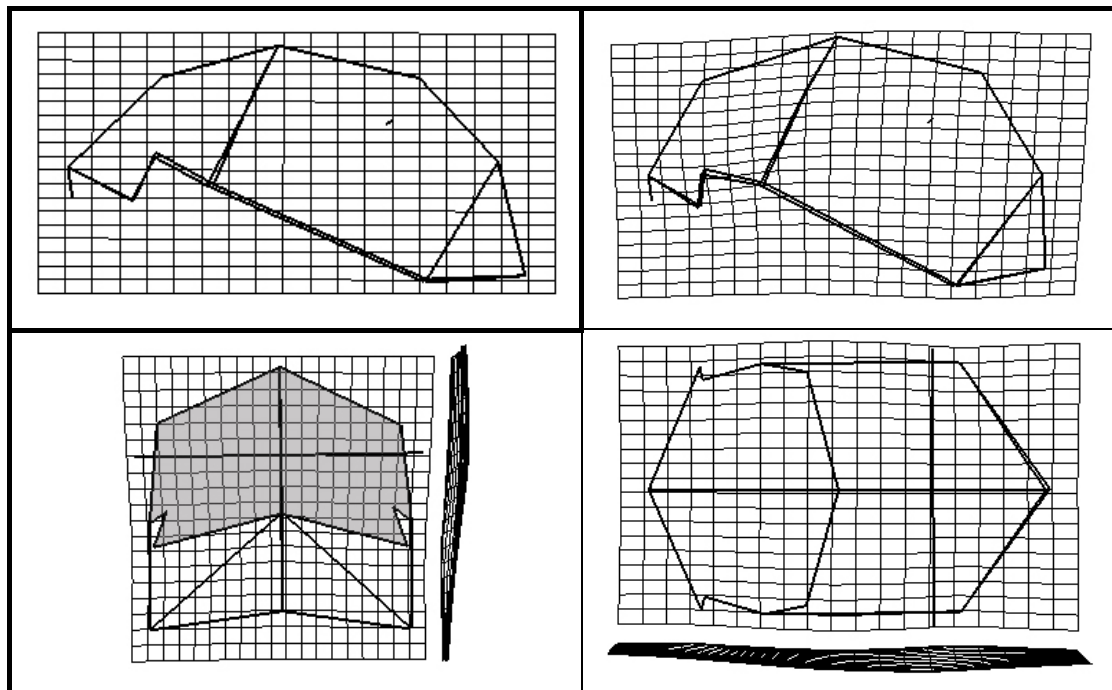


Figure 191 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Petralona-Kabwe et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Le passage à la forme consensus des *Homo sapiens* préhistoriques nécessite une forte réduction de la largeur biastérique (figure 191) avec un astérion plus interne ce qui entraîne la réduction de l'angle astérion – lambda – astérion. La calotte crânienne des *Homo sapiens* préhistoriques est plus curviligne sagittalement avec un métopion bien plus antérieur et plus haut, un bregma et un sagittum plus hauts, et une corde glabellé – opisthocranion réduite (l'opisthocranion se trouve sous le lambda en projection horizontale). Le point fronto-malaire temporal est moins externe. Le point fronto-temporal est plus externe et plus antérieur. Ceci donne une constriction post-orbitaire plus faible. Les stéphanions sont plus écartés du plan sagittal. En vue frontale la calotte crânienne des *Homo sapiens* a un aspect vertical. En vue supérieure la calotte crânienne n'est plus divergente par rapport à celle des deux *Homo heidelbergensis*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne des *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques

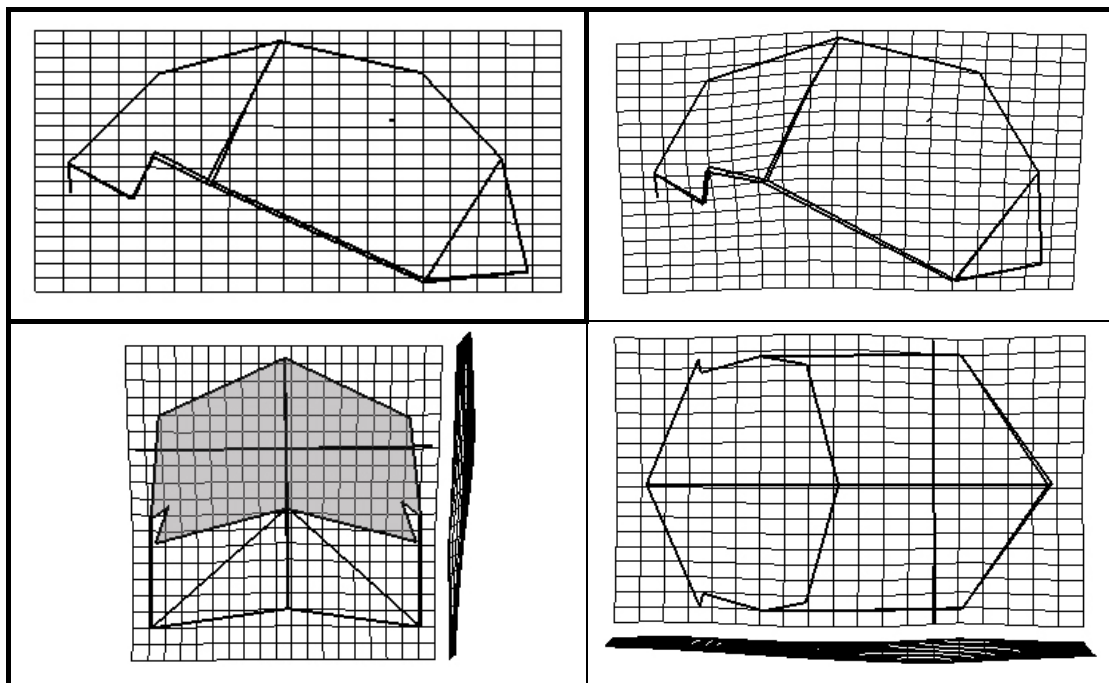


Figure 192: Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Les différences morphologiques constatées entre les *Homo erectus* et les *Homo sapiens* préhistoriques sont comparables à celles constatées entre Petralona – Kabwe et les *Homo sapiens* préhistoriques (proximité des formes consensus), mais moins marquées (figure 192).

**Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la calotte crânienne
des *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques**

Les différences entre la forme consensus des *Homo neanderthalensis* et celle des *Homo sapiens* préhistoriques (figure 193) sont nombreuses et marquées.

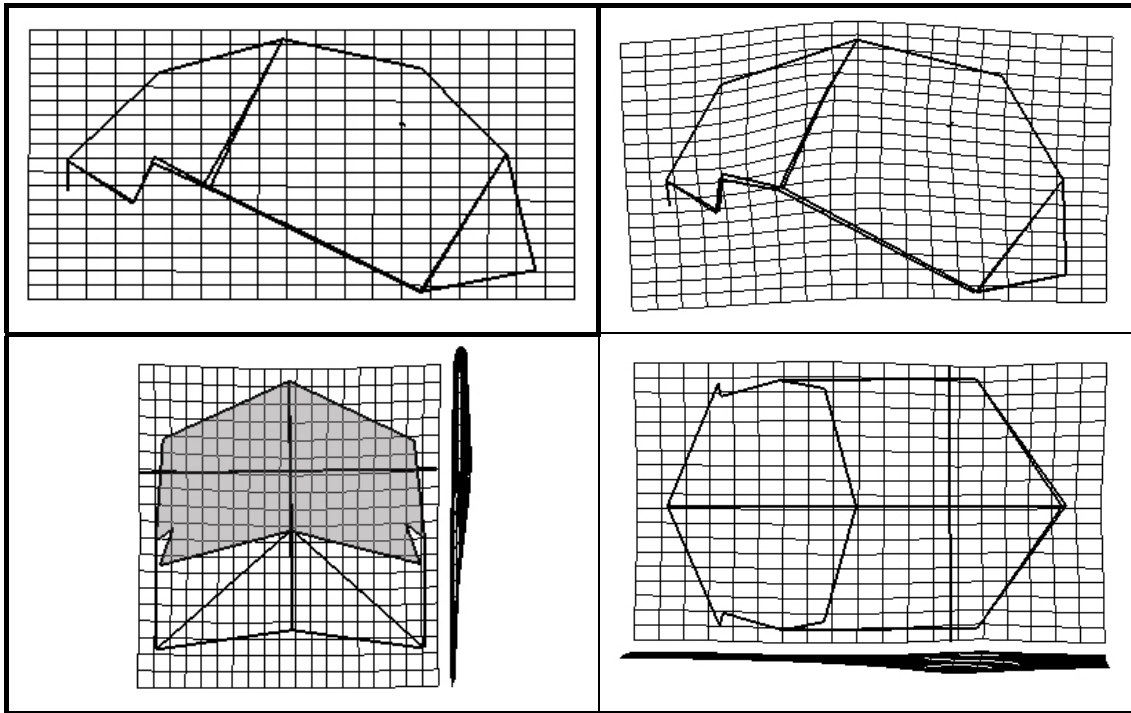


Figure 193 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Le contour sagittal de la calotte crânienne est beaucoup plus courbé pour les *Homo sapiens* préhistoriques (bregma et sagittum plus hauts, distance glabellae – opisthocranion moindre ; tendance à la brachycéphalie), notamment au niveau de l'écaille frontale du fait d'un métopion plus antérieur et plus haut. Leur astérion est plus antérieur, plus bas et plus interne. Ceci entraîne la réduction de la largeur biastérique et de l'angle astérion – lambda – astérion. Le point fronto-malaire temporal est plus externe tandis que le point fronto-temporal est plus interne. La constriction post-orbitaire qui était faible chez les Néandertaliens n'existe presque plus chez les *Homo sapiens*. Les stéphanions sont situés plus haut et sont moins écartés du plan sagittal chez les *Homo sapiens* préhistoriques (ce qui n'est plus le cas chez les formes historiques). Les bosses temporales dépassent le tracé de la suture pariéto-temporale en projection horizontale. En vue frontale la calotte crânienne présente des bords presque verticaux (segments sphénion – astérion) tandis que ceux-ci sont divergents vers le bas (astérions) chez les Néandertaliens.

VII.2.4 Modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale des espèces du genre *Homo*

Nous présentons en figure 194 le résultat de l'ACP portant sur les modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale pour le genre *Homo*. Les différents fossiles sont nommés dans les figures 195 et 196.

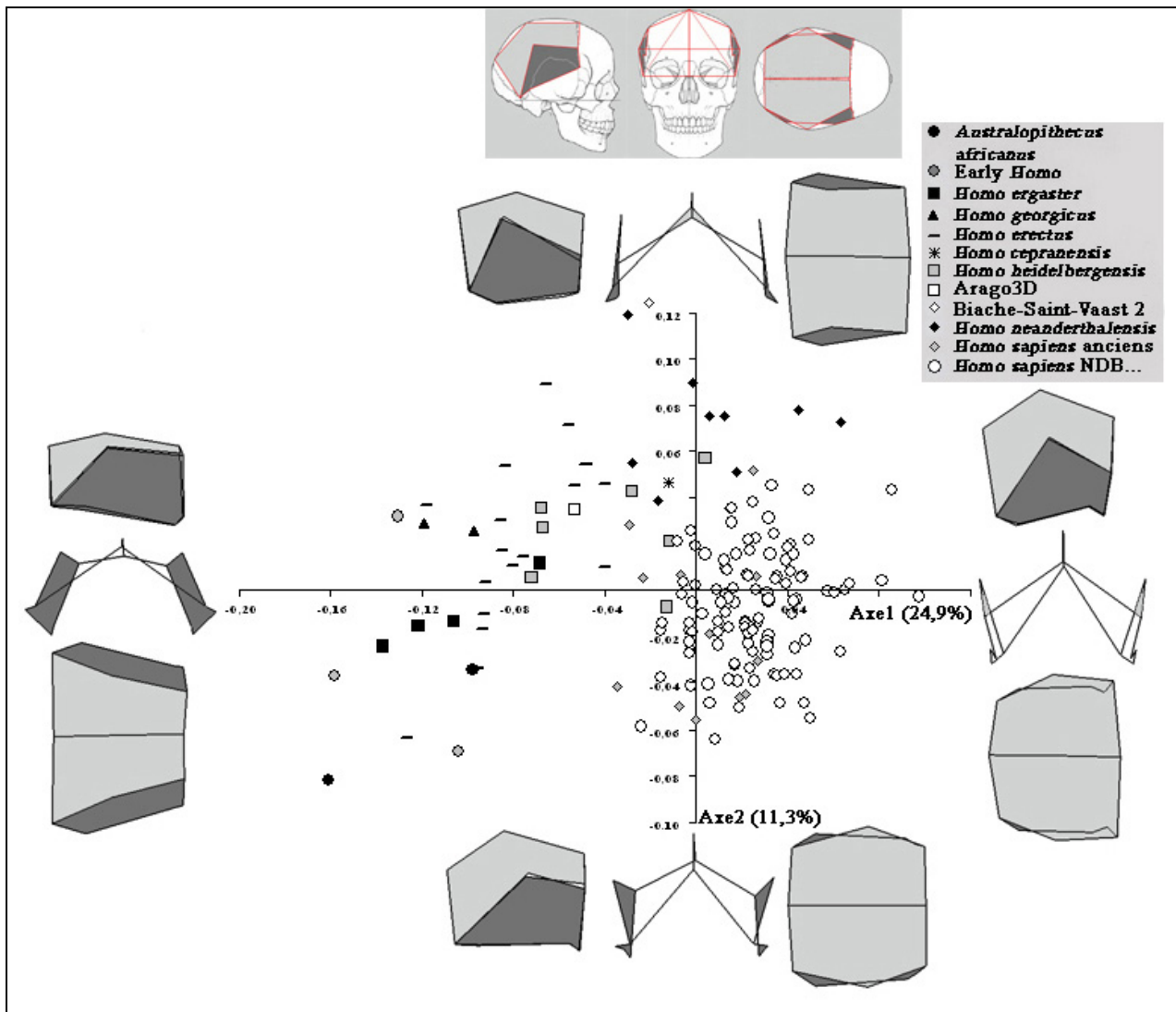


Figure 194 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale pour le genre *Homo*.

L'axe 1 explique 24,9% de la variance totale des individus étudiés contre 11,3% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent 36,2% de la variance totale (graphique 11).

Le passage de la valeur minimale (Sts 5) à la valeur maximale de l'axe 1 (*Homo sapiens* historiques) a lieu notamment en abaissant, en avançant et en déplaçant les stéphanions vers l'extérieur, en avançant le bregma et en surélevant le sagittum. Le contour

sagittal est anguleux par rapport aux valeurs minimales de l'axe 1. Les bosses pariétales se retrouvent plus hautes et plus externes. La position relative des bosses par rapport à la suture sagittale s'abaisse en vue latéralement en allant vers les spécimens historiques (valeur maximale de l'axe 1).

Le tracé modélisé de la suture pariéto-temporale change en allant, depuis la valeur minimale à la valeur maximale de l'axe 1, d'une forme de Z incliné vers la gauche à une forme de S incliné vers la droite pour les valeurs maximales de l'axe 1. Ceci est dû à un kryptaphion qui s'élève et recule et à une incisure pariétale haute et postérieure qui va baisser en allant vers les valeurs maximales de l'axe 1. De plus l'incisure pariétale devient plus interne. En parallèle le sphénion apparaît en retrait par rapport au bregma tandis que l'astérion s'avance par rapport au lambda. En projection sagittale la distance lambda – astérion augmente vers les valeurs positives de l'axe 1. Les astérions sont plus bas et plus internes, ce qui entraîne la diminution de l'angle astérion – lambda – astérion.

La largeur bistéphanique est toujours inférieure à celle entre les bosses pariétales malgré son accroissement du fait de la croissance de la largeur entre les bosses pariétales. La largeur bisphénique reste stable.

Latéralement la voûte bipariétale passe d'une forme basse et allongée antéro-postérieurement à une forme étroite étirée verticalement avec une inversion en projection sagittale des hauteurs avec d'abord un segment astérion – lambda inférieur au segment sphénion – bregma, puis l'inverse. En vue supérieure nous passons d'une voûte divergeant fortement postérieurement à une voûte à tendance convergente vers l'arrière. En vue frontale l'ouverture antérieure de la voûte bipariétale passe de biseau vers le haut à un biseau vers le bas.

Nous constatons en allant de la valeur maximale de l'axe 2 (Amud 1) à sa valeur minimale (Sts 5) que les bosses pariétales s'avancent dans le plan pariétal en devenant plus antérieures (elles passent d'une position postérieure à antérieure par rapport au sagittum) et plus externes. Ce mouvement s'accompagne de l'abaissement du lambda dans le plan sagittal par rapport au sagittum (l'angle sagittum – lambda – bregma s'accroît). Le sphénion est situé plus bas par rapport au kryptaphion. Le stéphanion se positionne plus haut en allant vers les valeurs négatives de l'axe 2. La distance entre l'astérion et l'incisure pariétale diminue en allant vers les valeurs négatives. De plus la largeur biastérique diminue légèrement.

La voûte bipariétale passe en vue supérieure d'une configuration tridimensionnelle, large bilatéralement, à une configuration d'aspect carré.

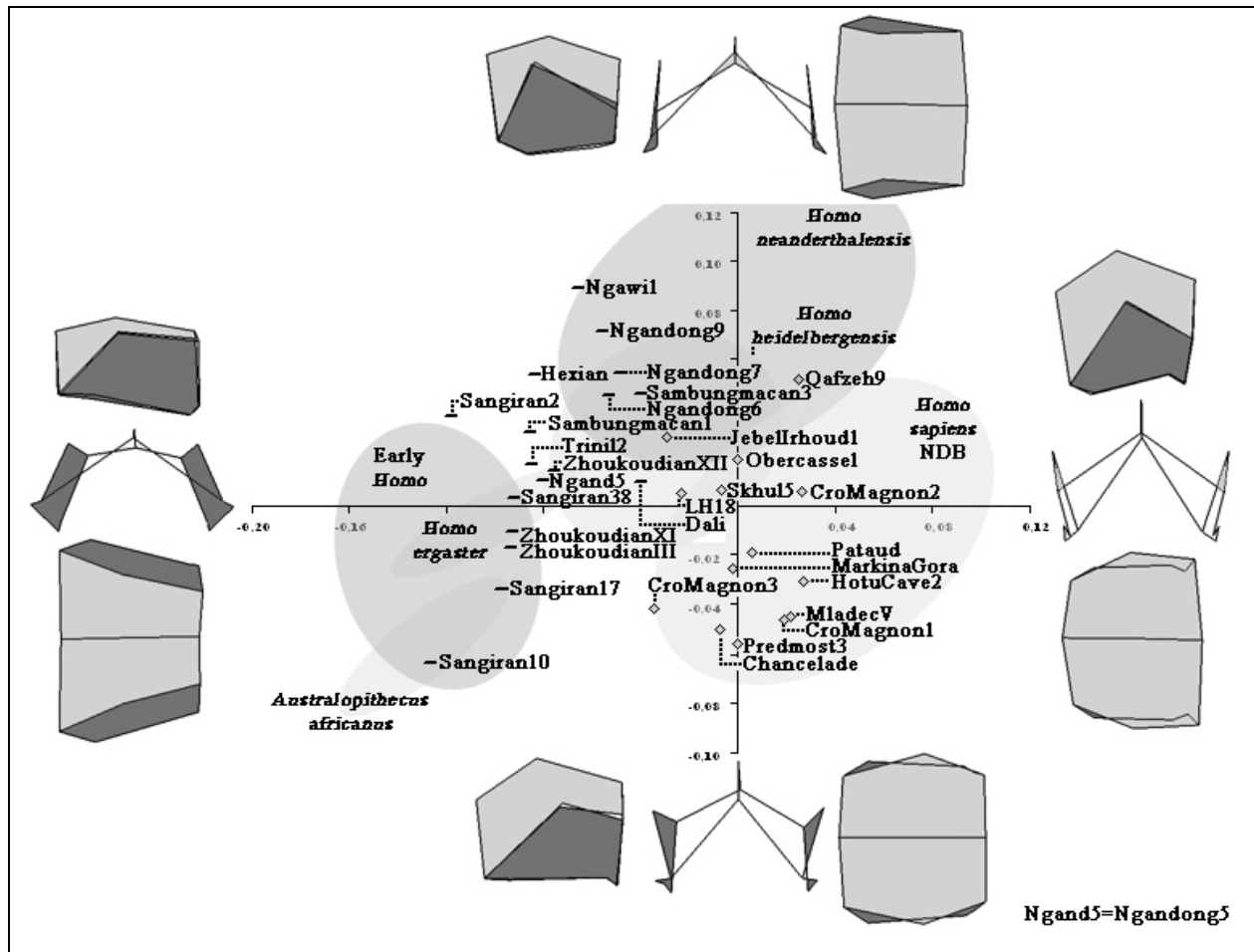


Figure 195 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale pour le genre *Homo* ; Nom des individus.

Située à l'extrémité négative de l'axe 1 (-0,16) avec une valeur de -0,08 sur l'axe 2, la voûte bipariétale du spécimen Sts 5 présente un os allongé antéro-postérieurement avec une facette latérale importante, oblique vers l'avant et vers le haut. L'angulation sagittum – lambda – bregma est faible. En vue latérale les segments lambda – astérion et bregma – stéphanion – sphénion sont presque verticaux avec une légère avancée du stéphanion par rapport au bregma et du sphénion par rapport au stéphanion. La ligne pariéto-temporale forme un Z incliné vers la gauche.

Nous trouvons ensuite la forme consensus des premiers *Homo* dispersés le long de l'axe 1 (-0,16 pour KNM-ER 1813 à -0,10 pour KNM-ER 1470) et de l'axe 2 (-0,07 pour KNM-ER 1470 à +0,03 pour OH 7). Les trois individus étudiés présentent tous un contour sagittal préférentiellement allongé antéro-postérieurement. OH 7 possède la configuration la plus compacte antéro-postérieurement et la plus large au niveau des astérions.

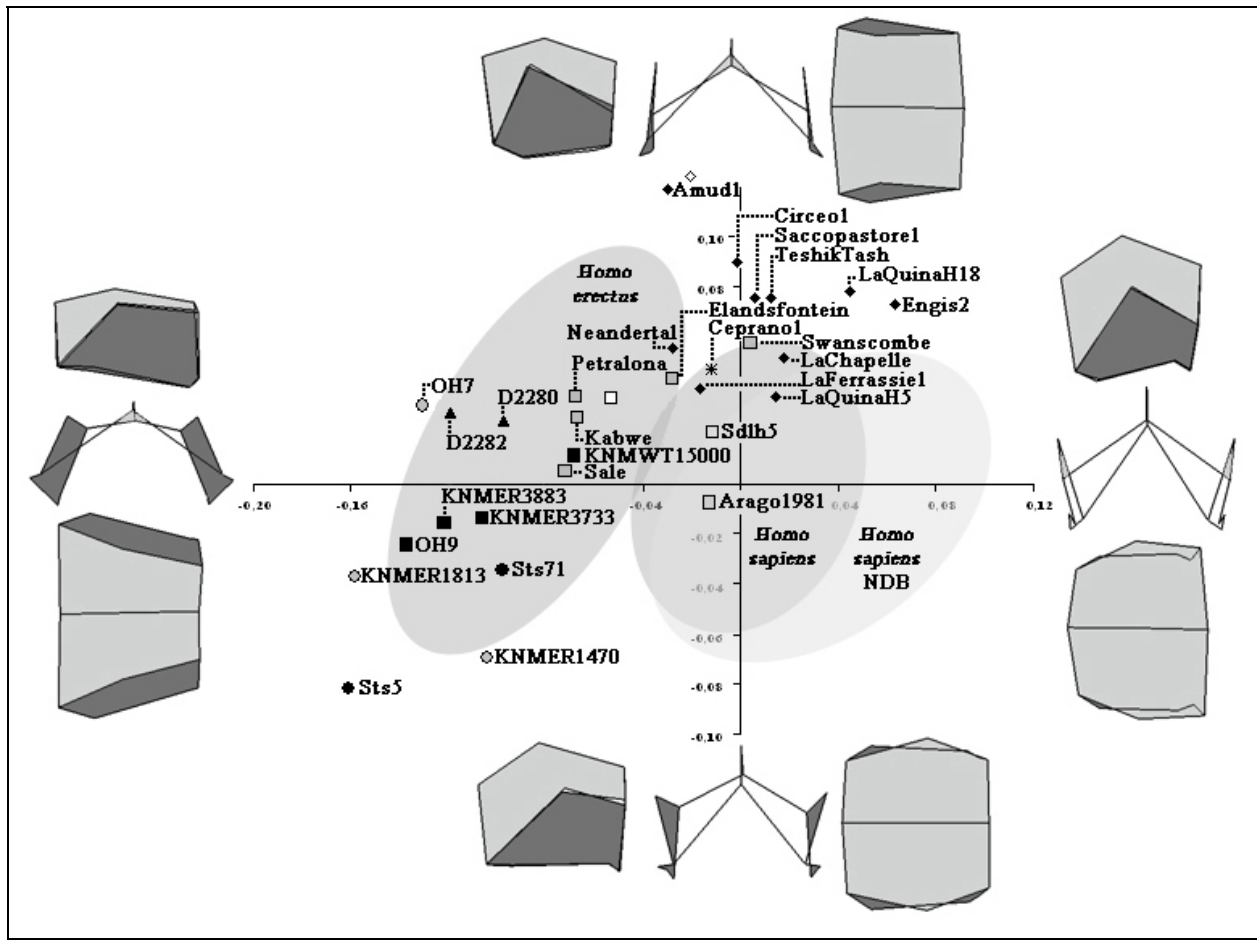


Figure 196 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation de la voûte bipariétale pour le genre *Homo* ; Nom des individus - bis.

La forme consensus suivante correspond à celle de l'espèce *Homo ergaster*. Ce groupe est relativement homogène, s'étendant de -0,14 à -0,105 sur l'axe 1 et de -0,02 à -0,01 sur l'axe 2. La suture pariéto-temporale modélisée est presque rectiligne en vue latérale. Nous notons que KNM-WT 15000 est plus décalé, se trouvant aux coordonnées (-0,07 ; +0,01). Cet adolescent présente une ouverture bistéphanique supérieure ce qui entraîne une ouverture antérieure de la voûte et un relèvement de la partie inférieure de l'écaille pariétale (segment sphénion – stéphanion plus vertical). Latéralement il présente une configuration moins allongée et plus haute. Les bosses pariétales se retrouvent sous le sagittum.

Ses différences avec les autres individus attribués phylétiquement à cette espèce pouvant être liées à l'âge, nous le conservons seulement à titre indicatif.

Les deux spécimens d'*Homo georgicus*, D2282 et D2280, ont une forme consensus située aux coordonnées (-0,11 ; +0,02), avec une valeur proche mais supérieure, sur l'axe 1 et nettement supérieure sur l'axe 2, à celles de la forme consensus des *Homo ergaster*. Des deux individus, D2282 présente la configuration tridimensionnelle de la voûte bipariétale la plus

évasée vers le bas avec des largeurs bistéphanique et entre les bosses pariétales plus faibles que celles de D2280 et des largeurs biastérique et bisphénique supérieures.

Nous avons ensuite sur l'axe 1 les *Homo erectus*. La population étudiée est assez dispersée avec des valeurs allant de -0,12 (Sangiran 2) à -0,04 (Sambungmacan 3) sur l'axe 1 et de -0,06 (Sangiran 17) à +0,09 (Ngawi 1) sur l'axe 2. Il est impossible de distinguer les différents individus suivant leur localisation géographique (Chine, Indonésie). Nous considérons donc la population dans son ensemble.

L'individu d'aspect le plus archaïque (valeur la plus basse sur l'axe 1) est Sangiran 10. Celui-ci est le plus proche de Sts 5 sur les axes 1 et 2. La répartition des individus suit un axe à tendance oblique allant des valeurs (-0,12 ; -0,06) à (-0,04 ; +0,09). Le long de cet axe les individus passent d'une forme archaïque proche de Sts 5 avec un aspect rectangulaire de l'écaille en vue latérale à une forme plus évasée vers le haut avec Ngawi 1. Ceci correspond à une longueur bregma – lambda supérieure à la longueur astérion – sphénion pour cet individu. Ngawi 1 présente une suture pariéto-temporale en « cuvette » avec une incisure pariétale et un kryptaphion placés sous la ligne astérion – sphénion. Il y a variation de la position de l'incisure pariétale chez les *Homo erectus* étudiés. Les bosses pariétales de Ngawi 1 sont plus postérieures (en retrait du sagittum) et plus externes. L'écaille latérale est moins oblique, avec dans le plan frontal deux segments sphénion – stéphanion et astérion – bosse pariétale verticaux. Seul le kryptaphion dépasse du plan formé par ces deux segments. L'écart entre les stéphanions chez Ngawi 1 est en proportion supérieur à celui des autres *Homo erectus* et se situe plus bas. L'ouverture antérieure de la voûte est plus large et plus basse.

Les individus attribués à l'espèce *Homo heidelbergensis* sont surtout dispersés le long de l'axe 1 (-0,07 pour Sale à +0,005 pour Swanscombe) contre une répartition allant de +0,01 (Sale) à +0,055 (Swanscombe) sur l'axe 2.

Les *Homo heidelbergensis* considérés recouvrent les configurations tridimensionnelles des *Homo erectus*, *Homo sapiens* préhistoriques et historiques. Le passage de la forme de Sale à Sima de los Huesos 5 nécessite un abaissement du stéphanion (plus externe) en vue frontale et des bosses pariétales plus externes. La forme consensus présente une facette latérale verticale en vue frontale, et en vue latérale un os pariétal évasé vers le haut. La suture pariéto-temporale présente un tracé en S infléchi basculé vers la droite du fait d'un kryptaphion plus haut. La conformation tridimensionnelle de Swanscombe rappelle celles observées chez les Néandertaliens.

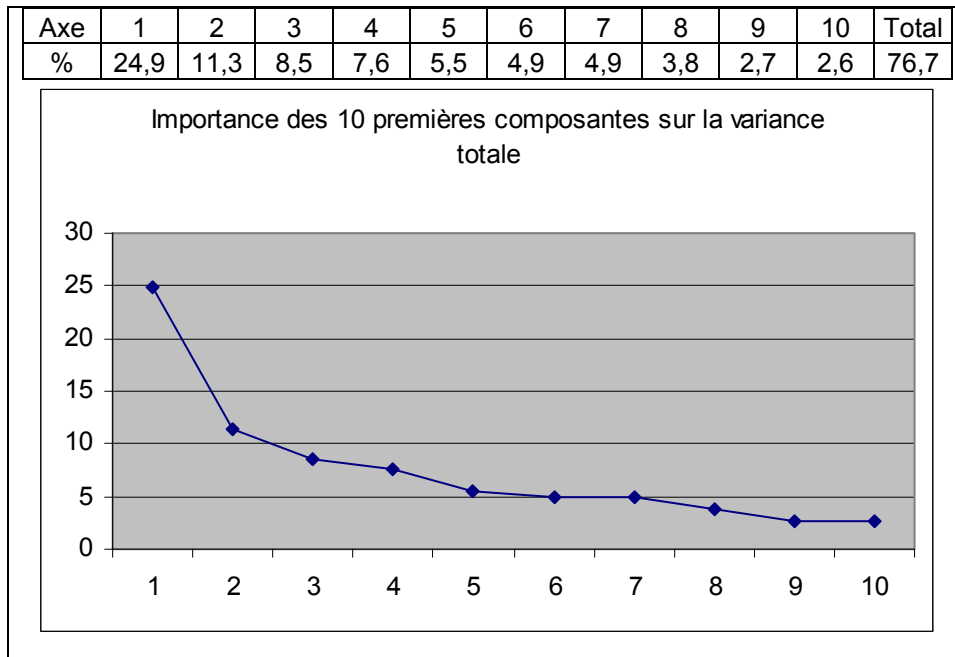
Notre proposition de reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2 présente une conformation tridimensionnelle qui diffère des autres *Homo heidelbergensis* suivant l'axe 2 et qui est semblable à celle du Néandertalien Amud 1.

Les *Homo neanderthalensis* étudiés sont assez homogènes le long de l'axe 1 (-0,03 pour Neanderthal 1 et Amud 1 à +0,02 pour La-Chapelle-Aux-Saints) et plus dispersés le long de l'axe 2 (+0,035 pour La Quina H5 à +0,12 pour Amud1) avec une écaille de plus en plus ouverte vers le haut en vue latérale et des bosses pariétales plus postérieures. Deux des trois spécimens juvéniles sont plus avancés le long de l'axe 1 (+0,04 pour La Quina H18 et +0,06 pour Engis 2) mais présentent les mêmes valeurs sur l'axe 2 que Saccopastore 1. Nous ne laissons ces spécimens juvéniles qu'à titre indicatif et n'en tenons pas compte dans la forme consensus.

Les configurations tridimensionnelles des *Homo sapiens* préhistoriques sont plus diverses que celles des Néandertaliens avec une répartition suivant l'axe 1 allant de -0,35 pour Cro-Magnon 3 à +0,03 pour Hotu Cave 2, Qafzeh 9 et Cro-Magnon 2, et pour l'axe 2 allant de -0,055 pour Predmost 3 à +0,05 pour Qafzeh 9.

Comme pour les *Homo erectus*, ces *Homo sapiens* préhistoriques sont répartis sous formes de groupes dont les limites maximales sont éloignées mais qui sont relativement en contact entre eux. Ainsi Cro-Magnon 2 est proche de Skhul 5, LH18 et de Obercassel suivant l'axe 2, et Qafzeh 9 est proche de Cro-Magnon 2 suivant l'axe 1.

A l'exception de Qafzeh 9, LH 18 et Cro-Magnon 3, toutes les configurations tridimensionnelles des *Homo sapiens* préhistoriques se confondent avec celles des *Homo sapiens* historiques. Cette population se répartie entre les valeurs -0,025 et +0,10 sur l'axe 1 et -0,065 et +0,045 sur l'axe 2. Nous passons d'individus avec une voûte bipariétale verticale en vue latérale à une configuration plus pentagonale avec un segment astérion – sphénion plus court que le segment bregma – lambda. Cette dernière conformation présente en vue frontale une écaille latérale oblique vers l'extérieur avec un stéphanion plus externe et plus bas. La variation se fait aussi au niveau de la hauteur du sagittum et des positions des bosses pariétales par rapport au sagittum.



Graphique 11: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale du genre *Homo*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des premiers *Homo* et des *Homo ergaster*

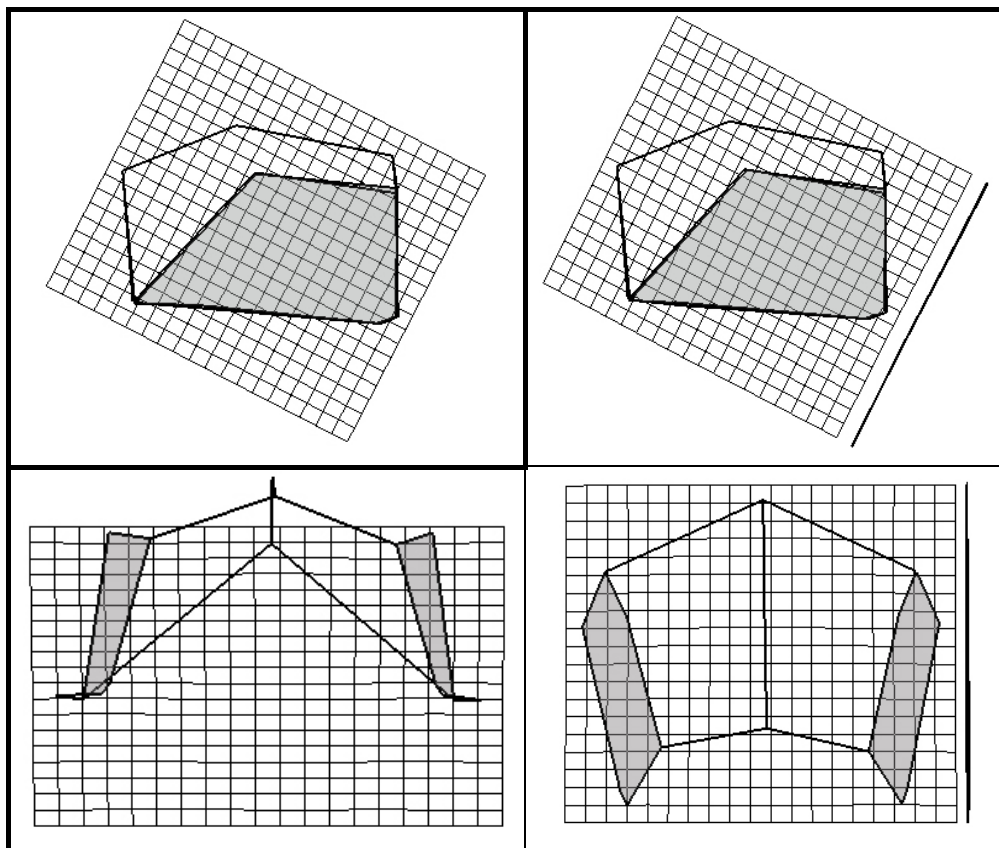


Figure 197 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* en TPS.

Nous ne constatons pas de différences notables entre ces configurations. Les configurations tridimensionnelles consensus correspondant aux premiers *Homo* et aux *Homo ergaster* sont similaires (figure 197). La voûte bipariétale est basse avec un sagittum peu élevé par rapport au segment bregma-lambda. La voûte est plus divergente postérieurement avec une largeur entre les incisures pariétales supérieure à la largeur biastérique, et nettement supérieure à la largeur bisphénique. Cette dernière est supérieure à la largeur bistéphanique. Les stéphanions sont hauts en projection latérale par rapport au bregma et aux sphénions. Les sphénions et les kryptophions sont positionnés plus bas que les astérions. L'angle astérion-lambda-astérion est aigu.

Cependant, nous rappelons que les *Homo ergaster* étudiés sont moins dispersés que les premiers *Homo* analysés. Nous rappelons aussi que nous n'avons pas tenu compte de KNM-WT 15000.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des premiers *Homo* et des *Homo georgicus*

En raison de la similarité des formes consensus des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* considérés, nous comparerons seulement la conformation tridimensionnelle des *Homo georgicus* avec celle des *Homo ergaster*.

Nous procéderons de la même manière pour les comparaisons entre premiers *Homo* – *Homo erectus*, premiers *Homo* – *Homo cepranensis*, premiers *Homo* – *Homo heidelbergensis*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo georgicus*

Les *Homo ergaster* ont une configuration tridimensionnelle différente de celle de la forme consensus des *Homo georgicus* (figure 198). Nous constatons un mélange de caractères plus anciens (plésiomorphes) et d'autres présents chez des spécimens plus modernes que D2282 et D2280 (apomorphes). La voûte bipariétale des *Homo georgicus* est plus courte avec une réduction des longueurs bregma – lambda et sphénion – astérion. Les bosses pariétales paraissent plus postérieures avec un positionnement plus antérieur du sagittum en vue latérale. Les stéphanions sont plus externes et plus bas en vue frontale. Les astérions sont plus internes en vue frontale. Tout ceci correspondrait à une forme consensus plus proche des *Homo sapiens* que ne l'est la forme consensus des *Homo ergaster*. Mais la largeur bilatérale entre les équivalents des bosses pariétales est plus réduite que celle relevée sur la forme consensus des *Homo ergaster*.

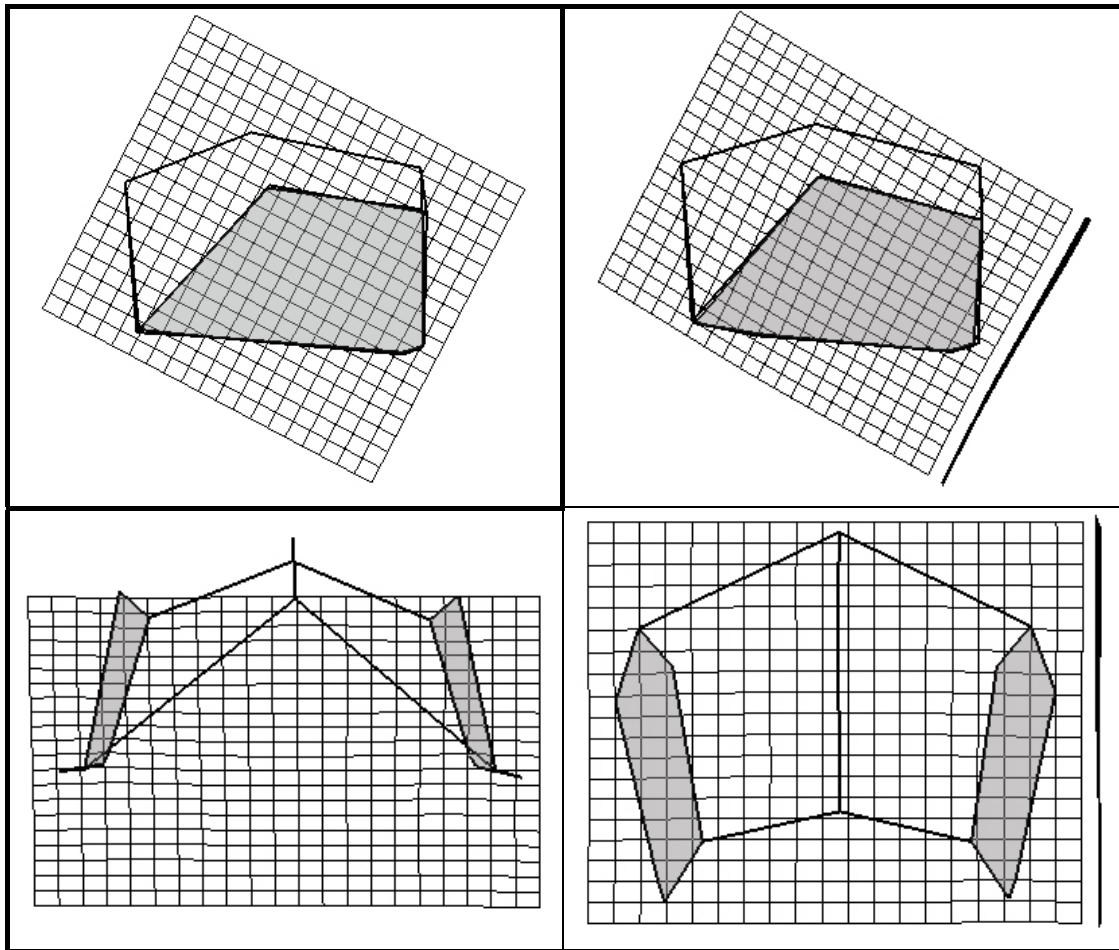


Figure 198 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo georgicus* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et de *Homo cepranensis*

Ceprano 1 (figure 199) présente par rapport aux *Homo ergaster* (et aux premiers *Homo*) un astérion plus antérieur, plus interne et plus bas tandis que le lambda est positionné plus haut et est plus antérieur. Ceci permet d'expliquer l'angle astérion – lambda – astérion plus fermé pour Ceprano 1 par rapport aux *Homo ergaster*. L'ensemble lambda – sagittum – bregma est plus haut par rapport à la base de la voûte bipariétale. Cette base (suture pariéto-temporale) présente une orientation opposée à celle des *Homo ergaster* avec l'incisure pariétale positionnée plus bas que tous les autres points de repères alors que le kryptaphion était le point inférieur de la modélisation consensus des *Homo ergaster* (et premiers *Homo*).

Latéralement l'écaille pariétale est moins allongée et plus verticale pour Ceprano 1. En vue supérieure la voûte possède un aspect plus rectangulaire au niveau supérieur (stéphanions – bosses pariétales), tandis qu'elle est toujours divergente au niveau des sutures pariéto-

temporales. En vue frontale les bords latéraux de l'écaille sont plus verticaux en raison de la poussée des stéphanions et des bosses pariétales.

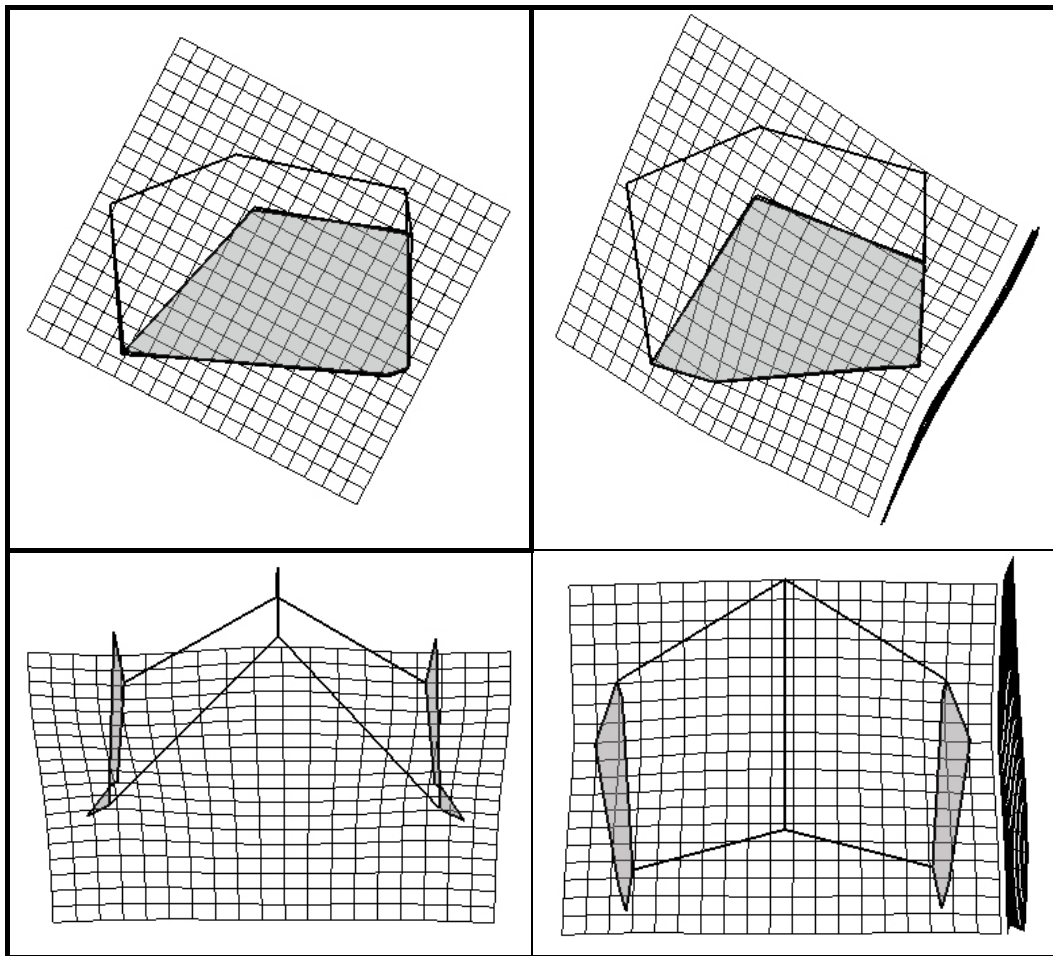


Figure 199 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et de *Homo cepranensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo heidelbergensis*

Les *Homo heidelbergensis* (figure 200) ont un astérion plus antérieur, plus interne et plus bas tandis que le lambda est plus haut et plus antérieur par rapport à ceux des *Homo ergaster* (et premiers *Homo*). L'angle astérion – lambda – astérion est plus fermé pour les *Homo heidelbergensis*. L'ensemble lambda – sagittum – bregma se situe plus haut par rapport à la base de la voûte bipariétale. La base (suture pariéto-temporale) a une orientation différente de celle des *Homo ergaster* avec l'incisure pariétale positionnée plus bas que tous les autres points de repères (contre le kryptaphion pour les *Homo ergaster*). Latéralement l'écaille pariétale est moins allongée et plus verticale pour les *Homo heidelbergensis*. En vue

supérieure, la voûte a un aspect moins divergent postérieurement au niveau supérieur (stéphanions – bosses pariétales), tandis qu'elle est toujours divergente au niveau des sutures pariéto-temporales. En vue frontale, les bords latéraux de l'écaille se redressent (poussée des stéphanions et des bosses pariétales).

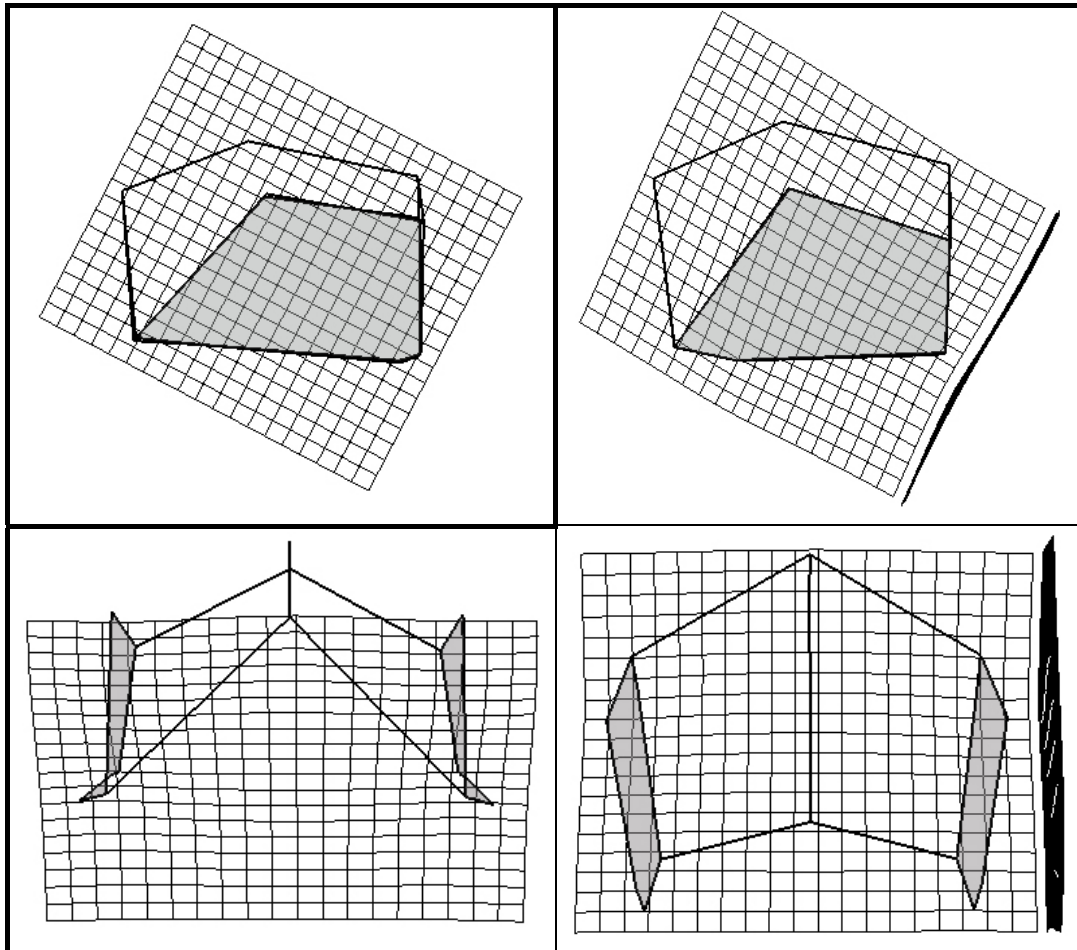


Figure 200 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo heidelbergensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo neanderthalensis*

La forme consensus des Néandertaliens adultes (figure 201) présente un astérion plus antérieur que celui des *Homo ergaster*, plus interne et plus bas. Le lambda est plus haut et plus antérieur. Ceci entraîne un angle astérion – lambda – astérion plus fermé pour les Néandertaliens. Le bord sagittal supérieur se situe plus haut du fait des mouvements du lambda, du sagittum et du bregma. La suture pariéto-temporale modélisée a une conformation différente de celle des *Homo ergaster* étudiés avec toujours l'incisure pariétale plus basse (et

plus interne) que tous les autres points de repères, et un kryptaphion au même niveau que le sphénion.

Latéralement l'écaille pariétale est moins allongée avec une tendance à l'étirement vertical pour les Néandertaliens. En vue supérieure, la voûte a un aspect presque rectangulaire au niveau de l'écaille supérieure (stéphanions – bosses pariétales), alors qu'elle diverge moins au niveau des sutures pariéto-temporales. En vue frontale les bords latéraux de l'écaille sont plus verticaux en raison de la poussée des stéphanions (position plus externe et plus basse) et des bosses pariétales (plus externes et positionnées postérieurement du sagittum en projection horizontale).

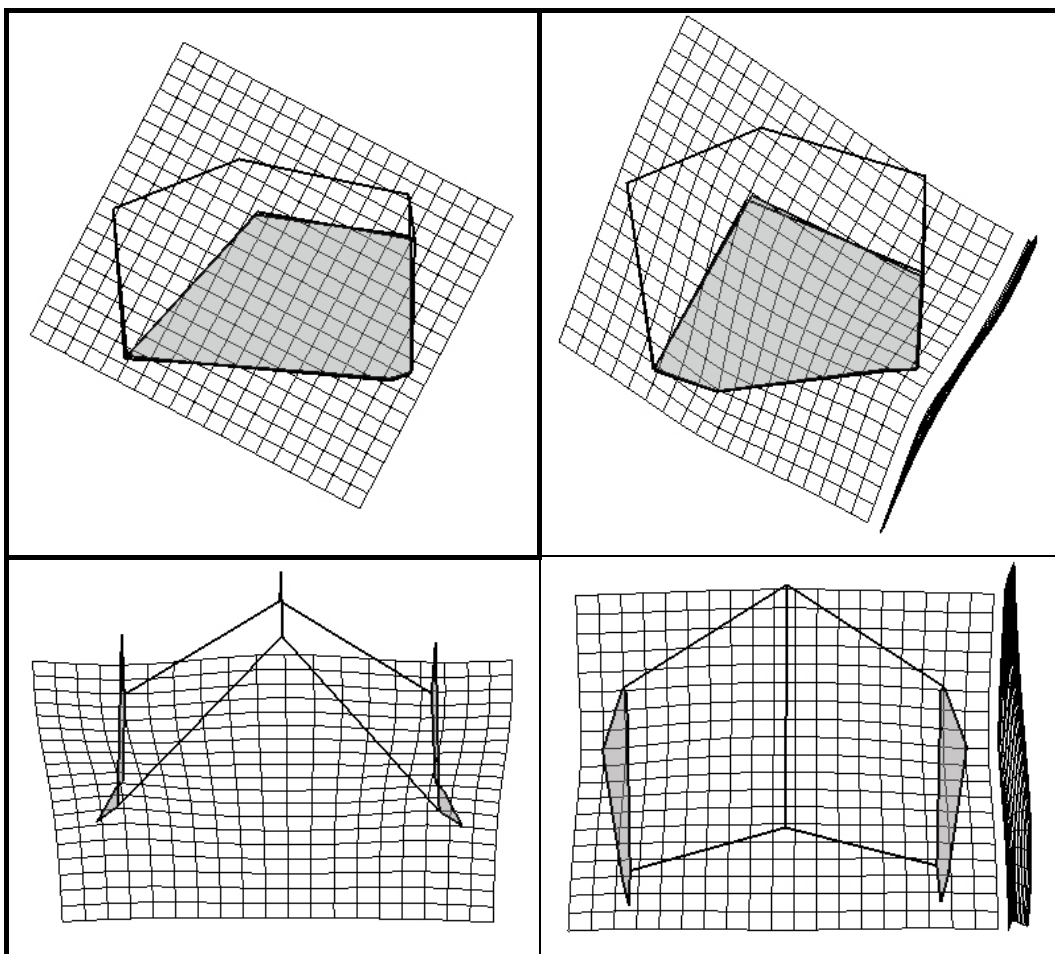


Figure 201 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo erectus*

La forme consensus de la voûte bipariétale des *Homo erectus* a un aspect plus compact (plus court) en vue latérale et en vue supérieure (figure 202). Ceci est dû à un lambda plus

haut et plus antérieur ainsi qu'à une avancée des astérions. Ceux-ci sont plus internes (angle astérion – lambda – astérion plus fermé). La suture pariéto-temporale n'est plus rectiligne en vue latérale en raison d'une position inférieure des kryptaphions et incisures pariétales par rapport aux sphénions et astérions. Les stéphanions se situent plus bas et plus à l'extérieur que chez les *Homo ergaster*. Le mouvement vers l'extérieur et vers le bas des stéphanions change la conformation de la voûte bipariétale en l'ouvrant antérieurement. Les bosses pariétales sont plus externes et en retrait par rapport au sagittum en projection horizontale.

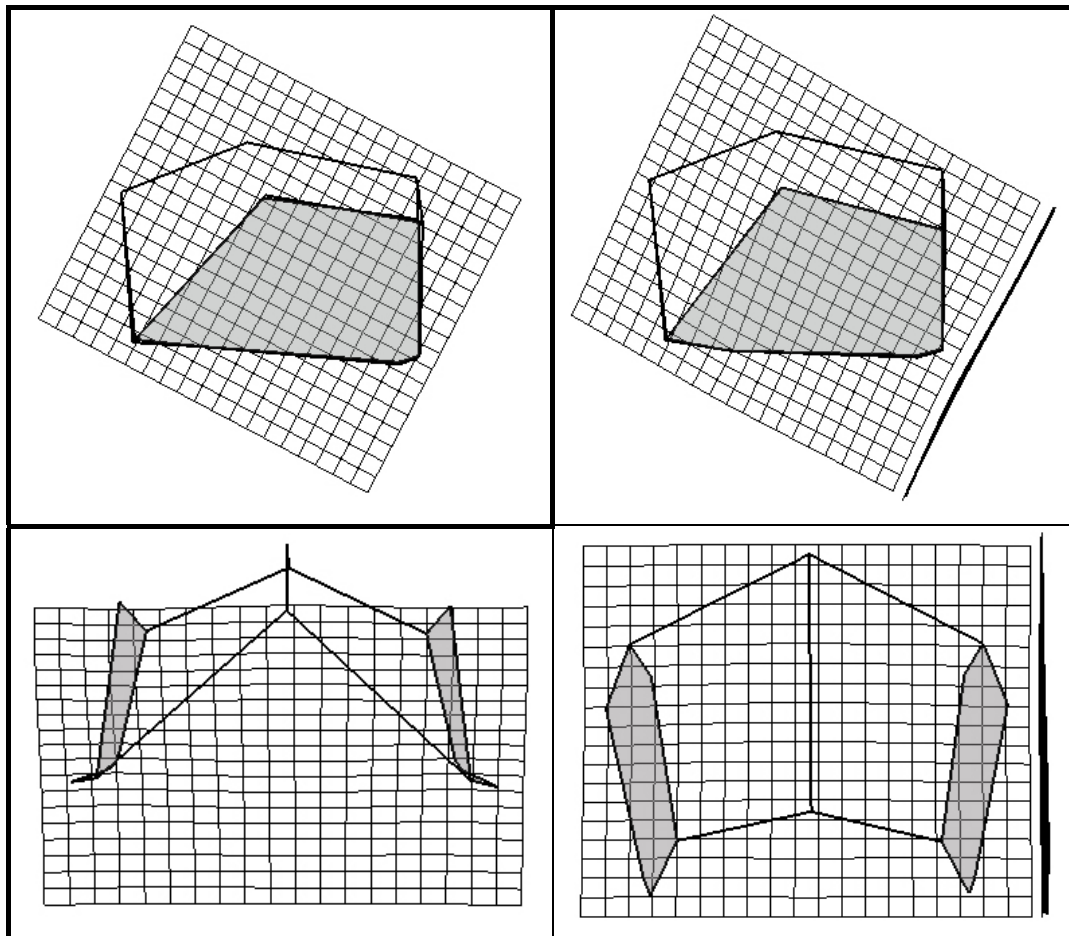


Figure 202 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo erectus* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les *Homo sapiens* préhistoriques présentent une modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale (figure 203) plus haute que celle des *Homo ergaster*. Cette forme compacte en vue latérale est due à une élévation du bregma, du sagittum et du lambda dans l'espace. Pour passer des *Homo ergaster* aux *Homo sapiens* préhistoriques le lambda ne subit pas de

mouvement antérieur, seulement un positionnement plus haut, tandis que les astérions se situent plus antérieurement, plus bas et deviennent plus internes. Ce positionnement des astérions entraîne un angle astérion – lambda – astérion plus faible. Le tracé de la suture pariéto-temporale a, chez les *Homo sapiens* préhistoriques, une forme de S inclinée sur la droite, dû fait d'un kryptaphion plus haut que le sphénion. L'incisure pariétale est plus interne.

Les stéphanions sont situés plus bas que les bosses pariétales et sont plus externes que chez les *Homo ergaster*. En projection frontale les segments sphénion – stéphanion sont presque verticaux. Ceci correspond à une verticalisation du bord latéral externe de la voûte bipariétale, phénomène observable en vue supérieure où l'écaille supérieure du pariétal recouvre presque l'écaille latérale par un positionnement plus externe des bosses pariétales. Celles-ci sont plus externes que l'astérion et le sphénion. Les bosses pariétales sont stables antéro-postérieurement mais sont plus externes et plus basses que le sagittum (plus haut).

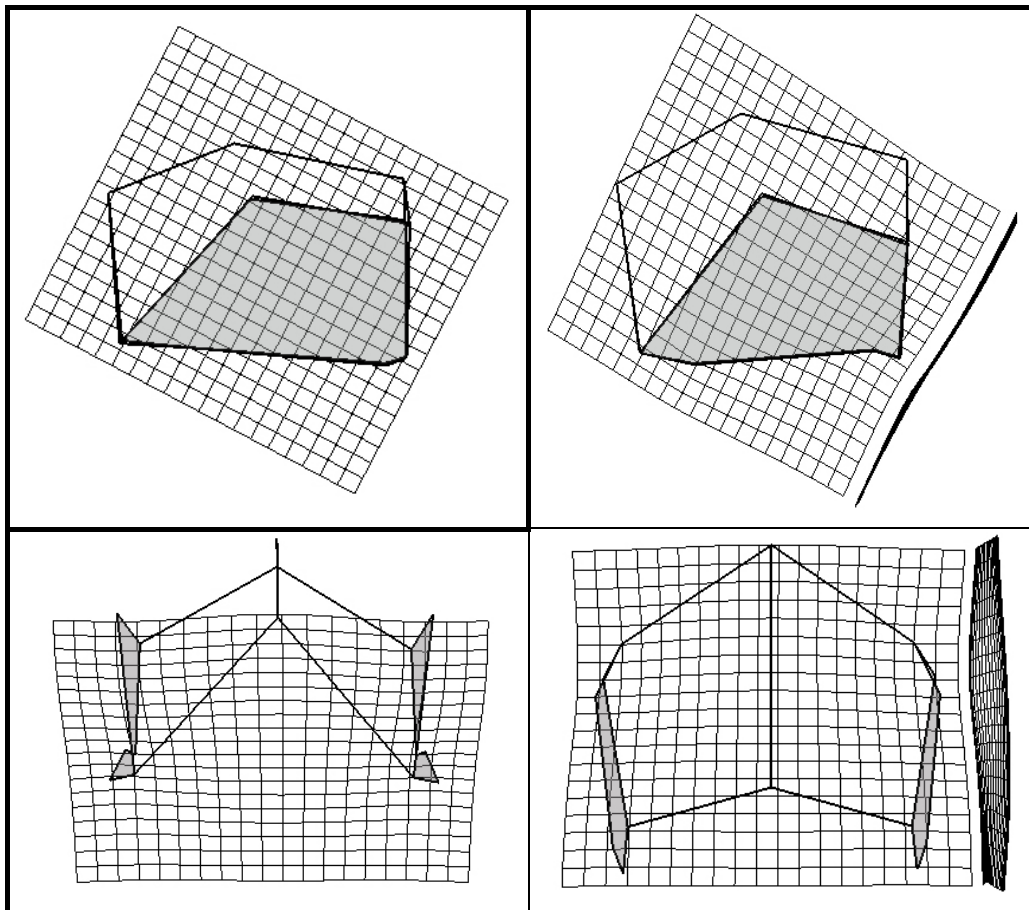


Figure 203: Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo ergaster* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques

Nous ne constatons entre les *Homo sapiens* préhistoriques et les *Homo sapiens* historiques (figure 204) que de faibles différences de conformations tridimensionnelles. Alors que l'astérion (plus antérieur) et le kryptaphion deviennent plus internes, les bosses pariétales ainsi que les stéphanions deviennent plus externes. Ceci entraîne en vue supérieure une écaille supérieure recouvrant plus l'écaille latérale. La suture inférieure est plus accentuée avec le kryptaphion plus haut par rapport au sphénion.

Le passage des individus préhistoriques à ceux historiques ne correspondant qu'à une accentuation des caractères de la population plus ancienne, nous conserverons celle-ci comme référence pour la comparaison des individus fossiles avec les *Homo sapiens*.

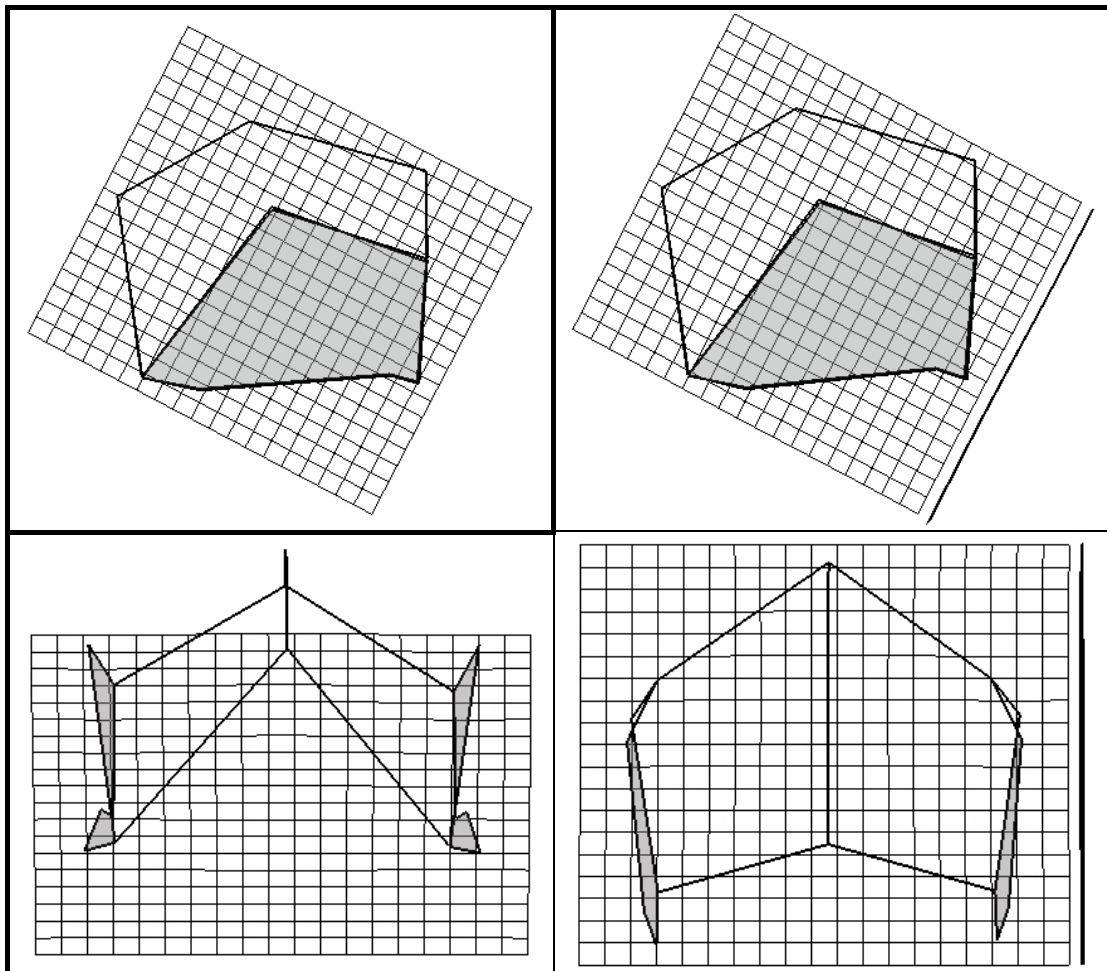


Figure 204 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo georgicus* et d'*Homo cepranensis*

Ceprano 1 a une conformation spatiale différente de celles de D2280 et D2282 (figure 205). Le passage de ceux-ci à Ceprano 1 nécessite un raccourcissement de la longueur sagittale de la voûte bipariétale (bregma – lambda) avec une avancée du lambda et une élévation de la voûte (bregma, sagittum, lambda plus hauts). Les astérions sont plus antérieures, plus bas et plus proches du plan sagittal (même mouvement pour les incisures pariétales). Ce mouvement des astérions contribue à réduire l'angle astérion – lambda – astérion. En vues frontale et supérieure les stéphanions s'écartent du plan sagittal tout comme les bosses pariétales. Ceci contribue (avec les mouvements de l'astérion) à donner en vue supérieure un contour rectangulaire à la portion supérieure de l'écaille. Ceci s'accompagne d'une verticalisation des facettes latérales du pariétal, qui ne sont plus orientées de manière oblique vers l'avant et le haut (mais latéralement, perpendiculaires à l'axe longitudinal de la voûte), comme c'était le cas chez les *Homo georgicus*.

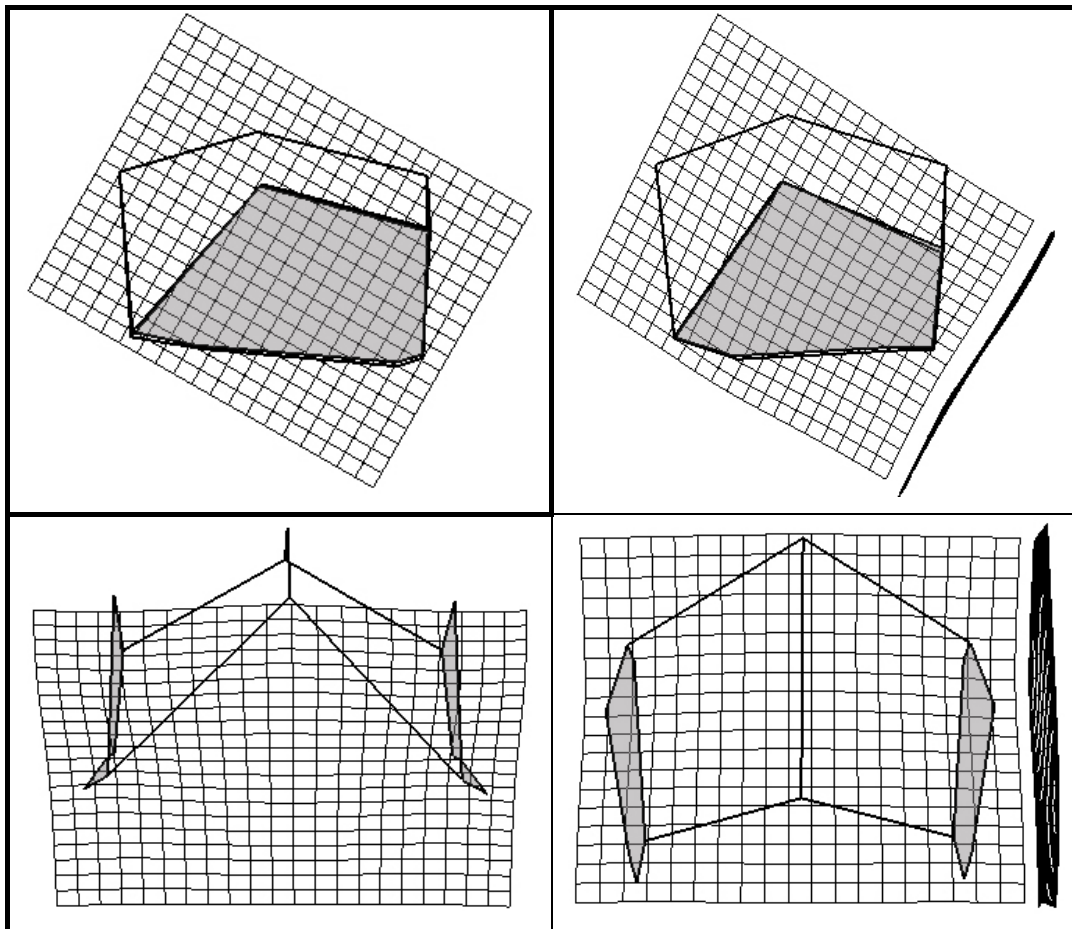


Figure 205 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo georgicus* et d'*Homo cepranensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo georgicus* et des *Homo heidelbergensis*

La voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* (figure 206) est légèrement moins longue en proportion que celle des *Homo georgicus* mais est plus haute (astérion plus bas, bregma et lambda plus hauts). En projection sagittale l'écart entre le sagittum et les bosses pariétales augmente. Latéralement le kryptaphion est plus haut, ce qui modifie le tracé de la suture pariéto-temporale. Frontalement l'astérion est plus interne tandis que les bosses pariétales sont plus externes que chez les spécimens de Dmanissi. La voûte bipariétale est plus ouverte antérieurement et se referme postérieurement. Ce mouvement correspond à la réorientation des facettes latérales de la voûte bipariétale.

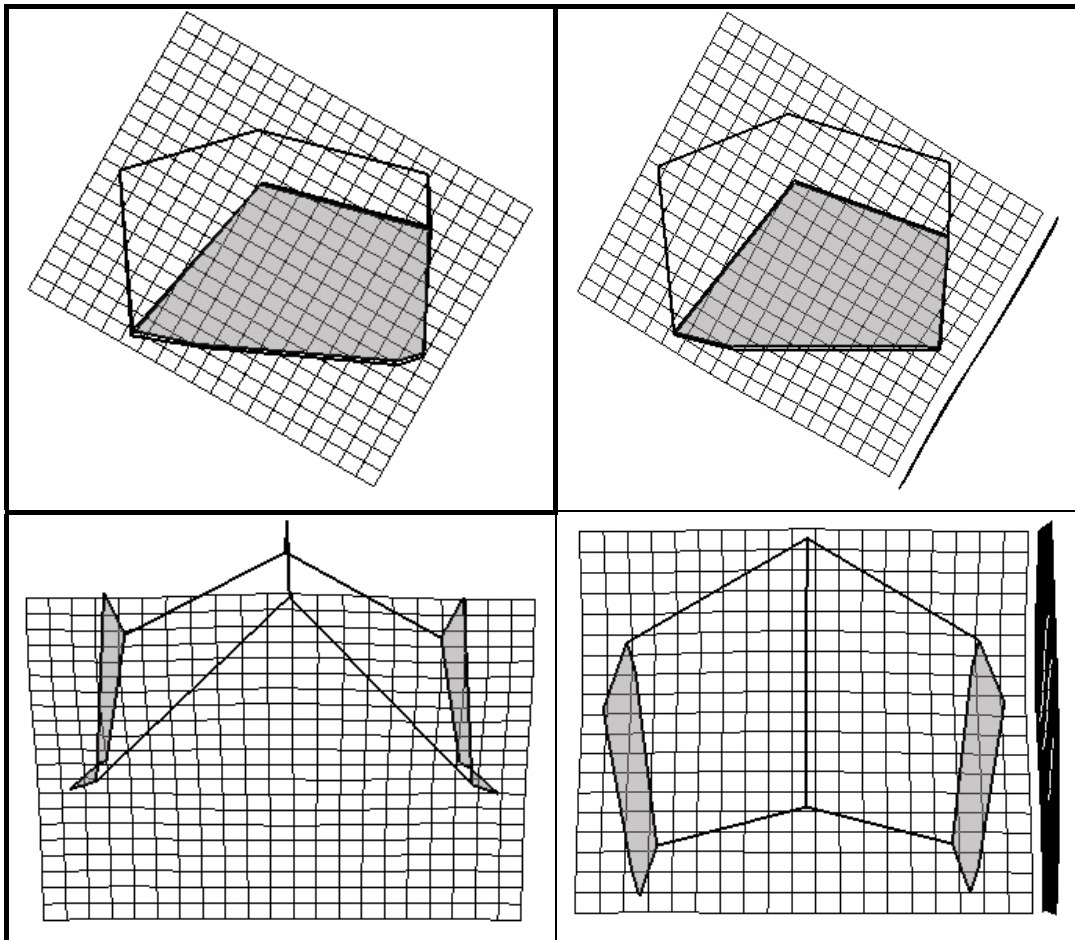


Figure 206 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo georgicus* et des *Homo heidelbergensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo georgicus* et des *Homo erectus*

Les différences de conformation tridimensionnelles entre les *Homo georgicus* et les *Homo erectus* sont du même type que celles observées entre les *Homo georgicus* et les *Homo heidelbergensis* mais dans une moindre ampleur (figure 207).

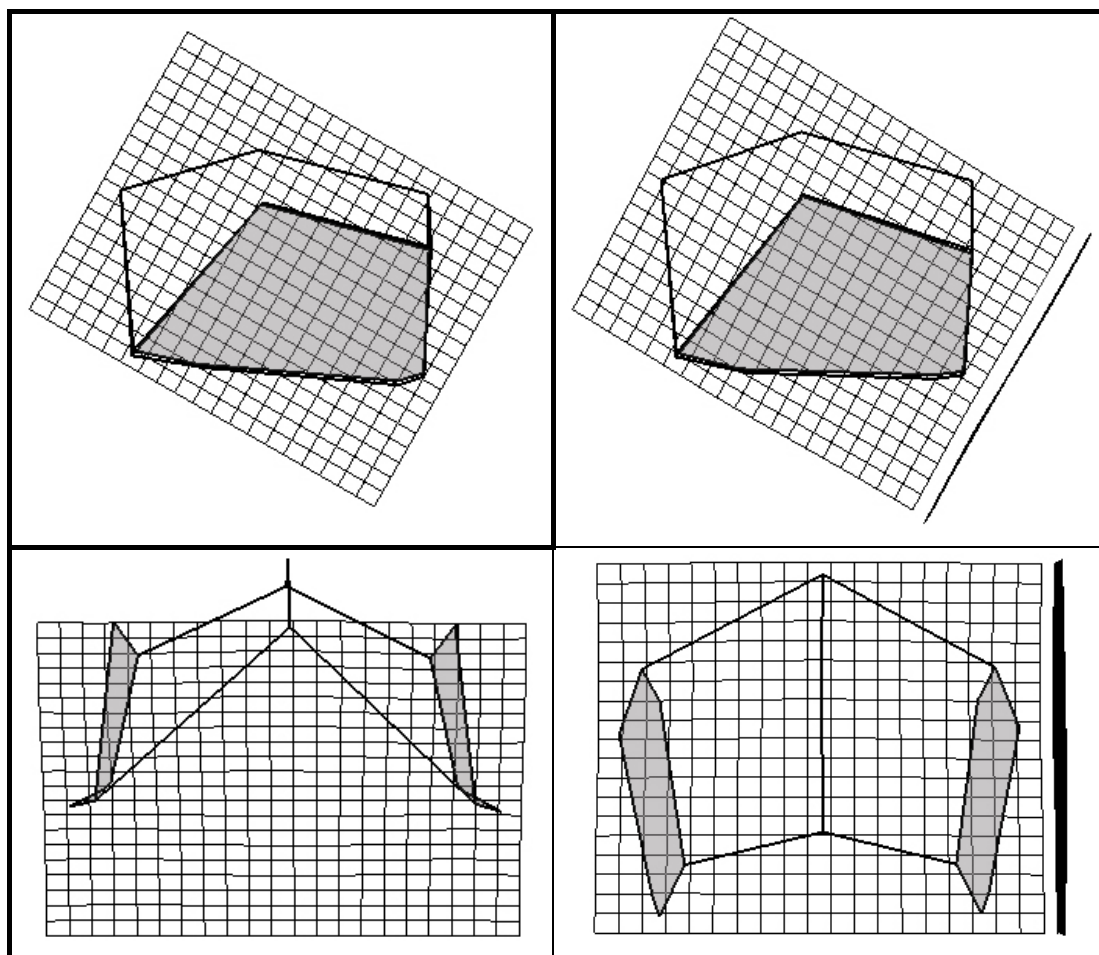


Figure 207 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo georgicus* et des *Homo erectus* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale d'*Homo cepranensis* et des *Homo heidelbergensis*

Passer de la conformation tridimensionnelle de Ceprano 1 à celle consensus des *Homo heidelbergensis* (figure 208) nécessite de revenir à une forme plus archaïque avec une voûte plus allongée et plus basse (lambda postérieur et bas, sagittum et bregma plus bas). Les bosses pariétales des *Homo heidelbergensis* sont plus antérieures chez ces individus. Au niveau inférieur, l'incisure pariétale de ces individus est plus haute que celle de Ceprano 1 (plus

proche du niveau de l'astérion). Les stéphanions de ces fossiles sont plus hauts, et moins externes.

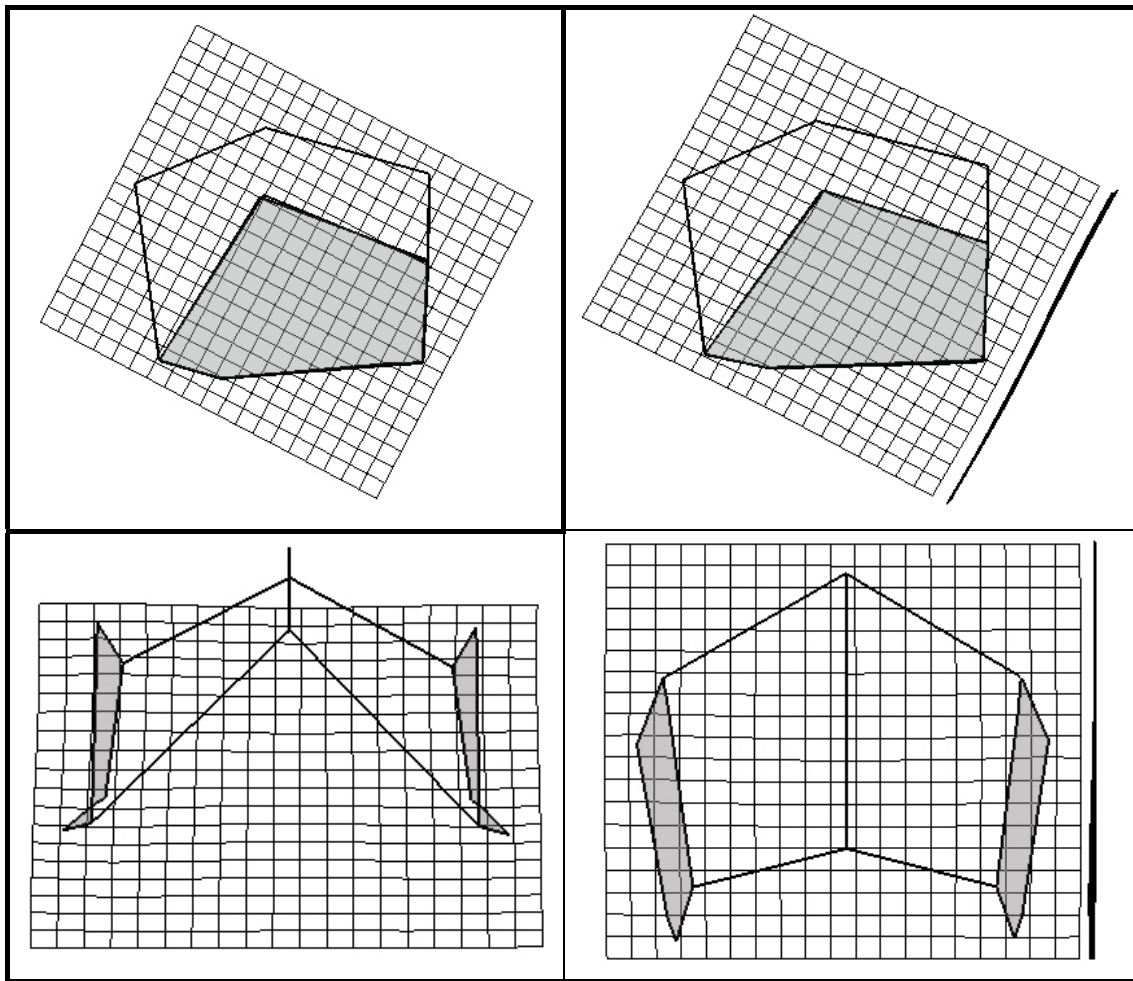


Figure 208 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale de *Homo cepranensis* et des *Homo heidelbergensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale d'*Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis*

La configuration tridimensionnelle consensus de Ceprano 1 est plus proche de celle des Néandertaliens adultes (figure 209) que de celle des *Homo heidelbergensis*. La configuration néandertalienne correspond à une distance astérion – sphénion plus faible que la distance lambda – bregma. Les bosses pariétales des Néandertaliens sont plus en retrait du sagittum en projection horizontale. Les segments sphénion – stéphanion sont presque verticaux chez les Néandertaliens alors qu'ils sont plus obliques (largeur bisphénique supérieure à la largeur bistéphanique) chez Ceprano 1.

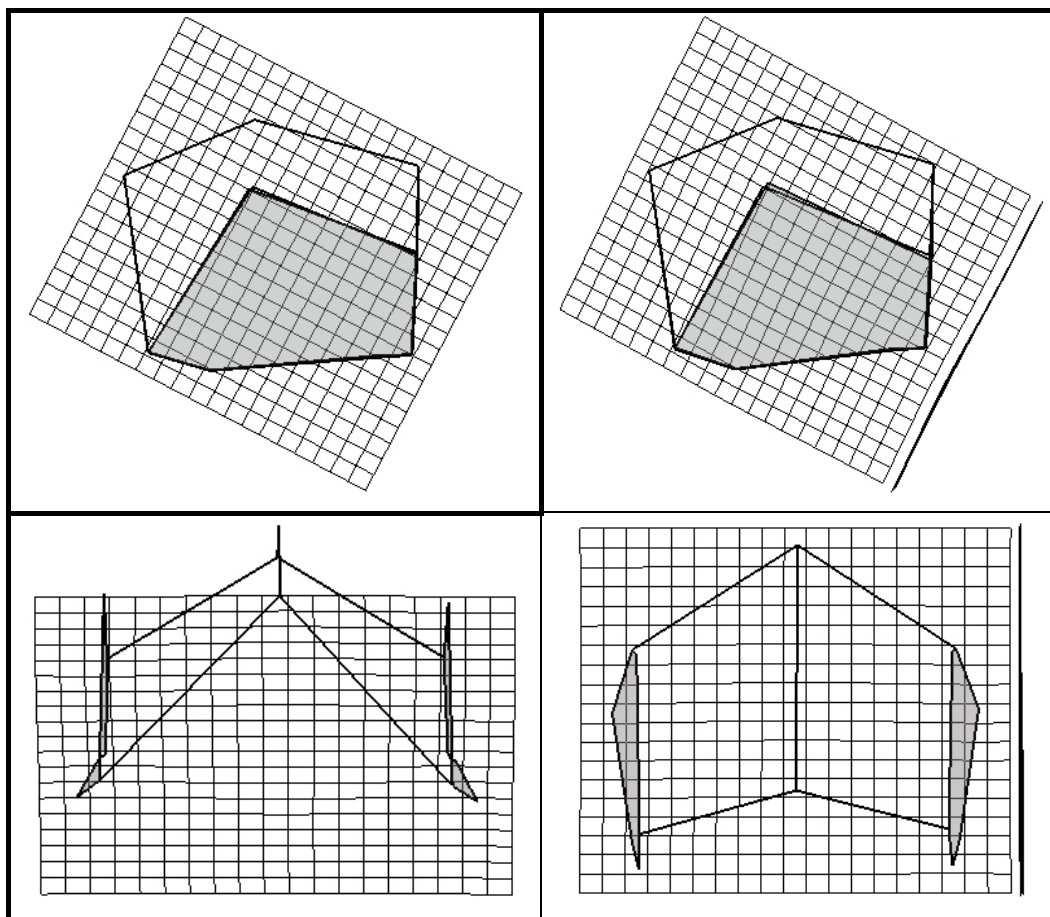


Figure 209 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale de *Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo cepranensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les *Homo sapiens* préhistoriques présentent une modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale (figure 210) plus haute que celle de Ceprano 1, avec notamment un sagittum plus élevé. Nous observons aussi comme différence une écaille supérieure recouvrant l'écaille latérale du pariétal en raison de bosses pariétales plus externes et en raison d'une suture pariéto-temporale plus interne (largeur biastérique et angle astérion – lambda – astérion plus faibles). Cette suture modélisée est assez différente chez les *Homo sapiens* préhistoriques avec une incisure pariétale moins basse et un kryptophion plus haut que le sphénion.

Les stéphanions sont situés plus haut chez les *Homo sapiens* préhistoriques que chez Ceprano 1, mais la largeur bistéphanique est identique. Les grilles de déformations permettent de constater que les différences entre ces deux populations sont surtout au niveau inférieur de la voûte bipariétale.

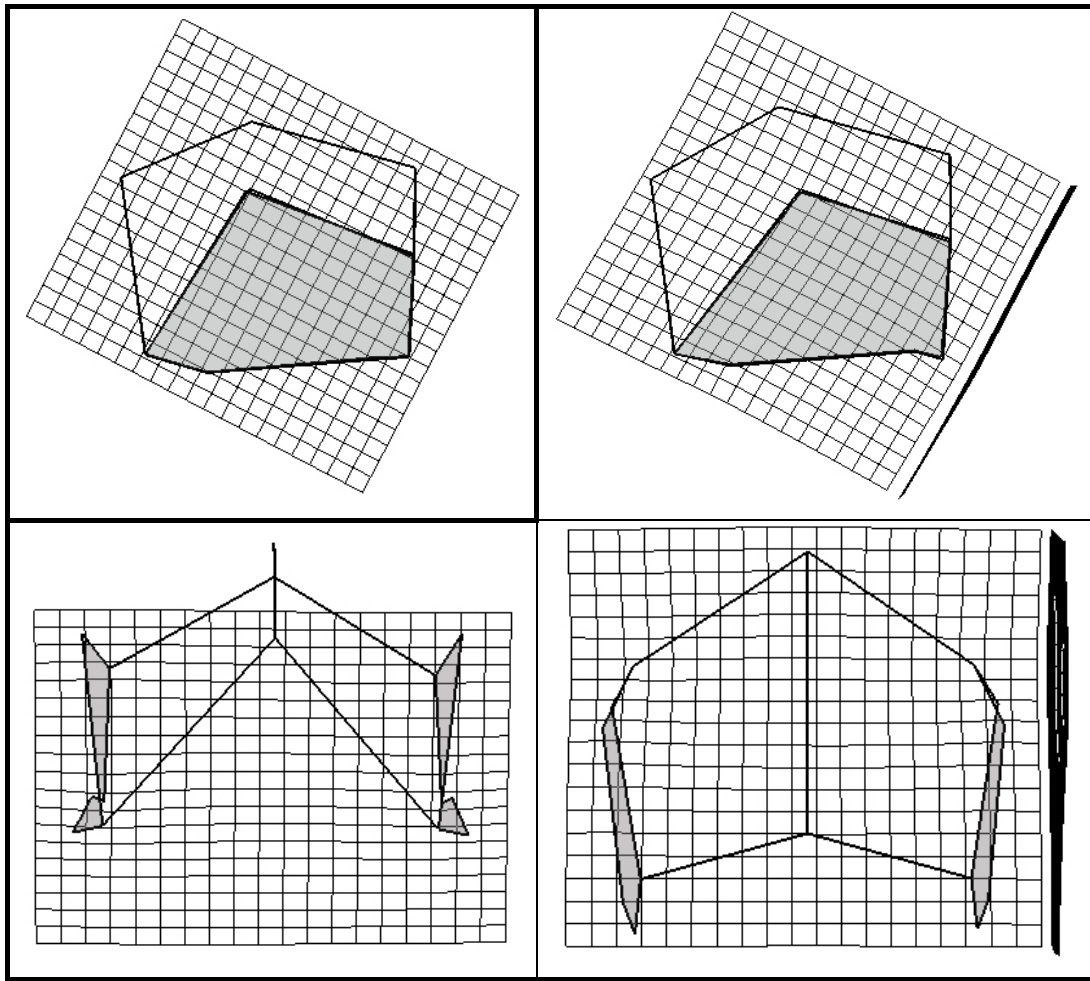


Figure 210 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale de *Homo cepranensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* et des *Homo erectus*

La forme consensus correspondant aux *Homo erectus* est plus archaïque que celle des *Homo heidelbergensis* étudiés (figure 211). Ces spécimens asiatiques ont une voûte sagittale plus basse par rapport à la suture inférieure. Le kryptaphion est plus bas que le sphénion. La base est plus large en proportion chez les *Homo erectus* que chez les *Homo heidelbergensis* au niveau des incisures pariétales et des astérions, ce qui entraîne un angle astérion – lambda – astérion supérieur à celui des *Homo heidelbergensis*. Les stéphanions des individus asiatiques sont plus hauts et plus internes que ceux des *Homo heidelbergensis*. Les facettes latérales de l'écaille pariétale sont plus inclinées chez les *Homo erectus*.

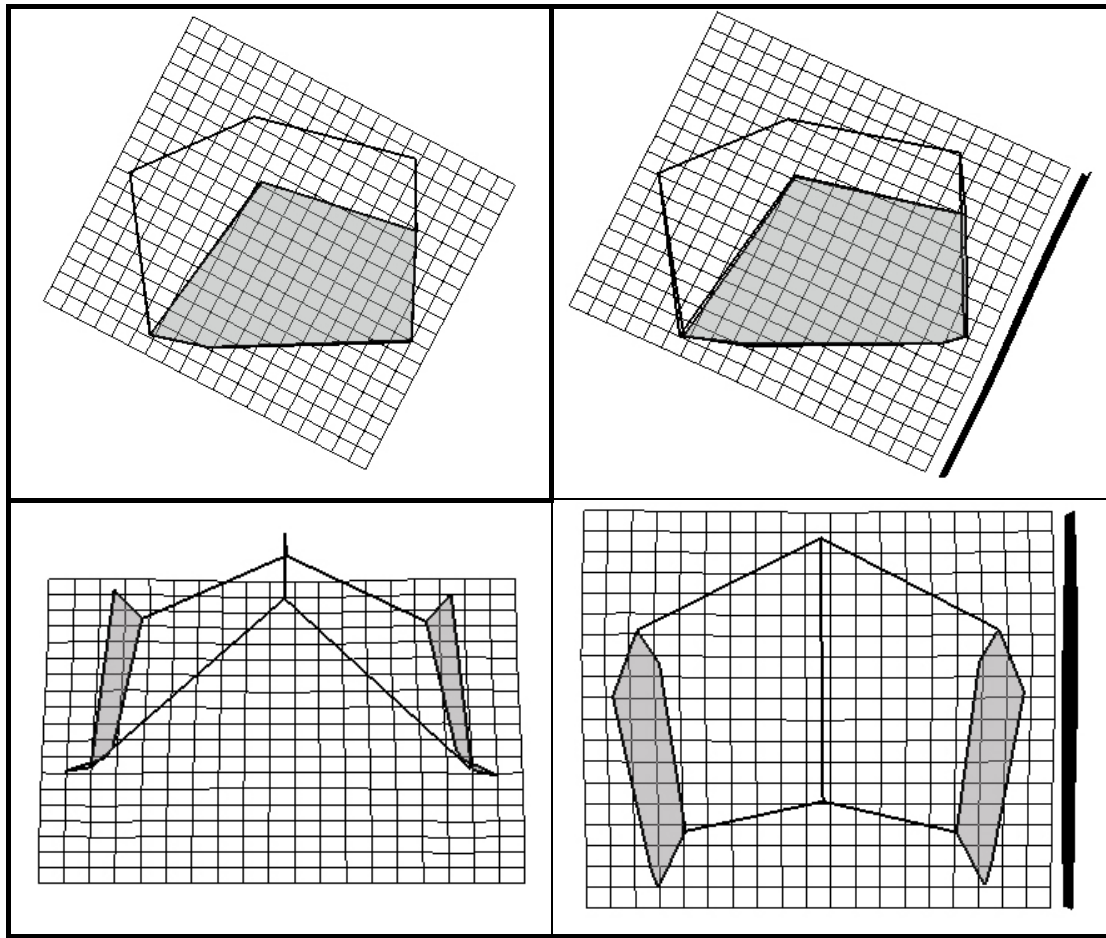


Figure 211 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* et des *Homo erectus* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* et des *Homo neanderthalensis*

Passer de la conformation tridimensionnelle consensus des *Homo heidelbergensis* à celle des Néandertaliens (figure 212) nécessite une réduction de la distance bregma – lambda ainsi qu’une réduction de la corde astérion – sphénion en projection sagittale. Les astérions sont plus internes, contribuant à réduire l’angle astérion – lambda – astérion. La voûte sagittale est plus haute pour les Néandertaliens. Les stéphanions de cette population sont plus bas et externes par rapport à ceux des *Homo heidelbergensis*. Les bosses pariétales des *Homo heidelbergensis* sont plus antérieures que celles des Néandertaliens. Au niveau inférieur l’incisure pariétale de ces Néandertaliens est située plus antérieurement et est plus interne que celle des *Homo heidelbergensis*. Les deux écailles supérieures présentent une forme carrée en vue supérieure.

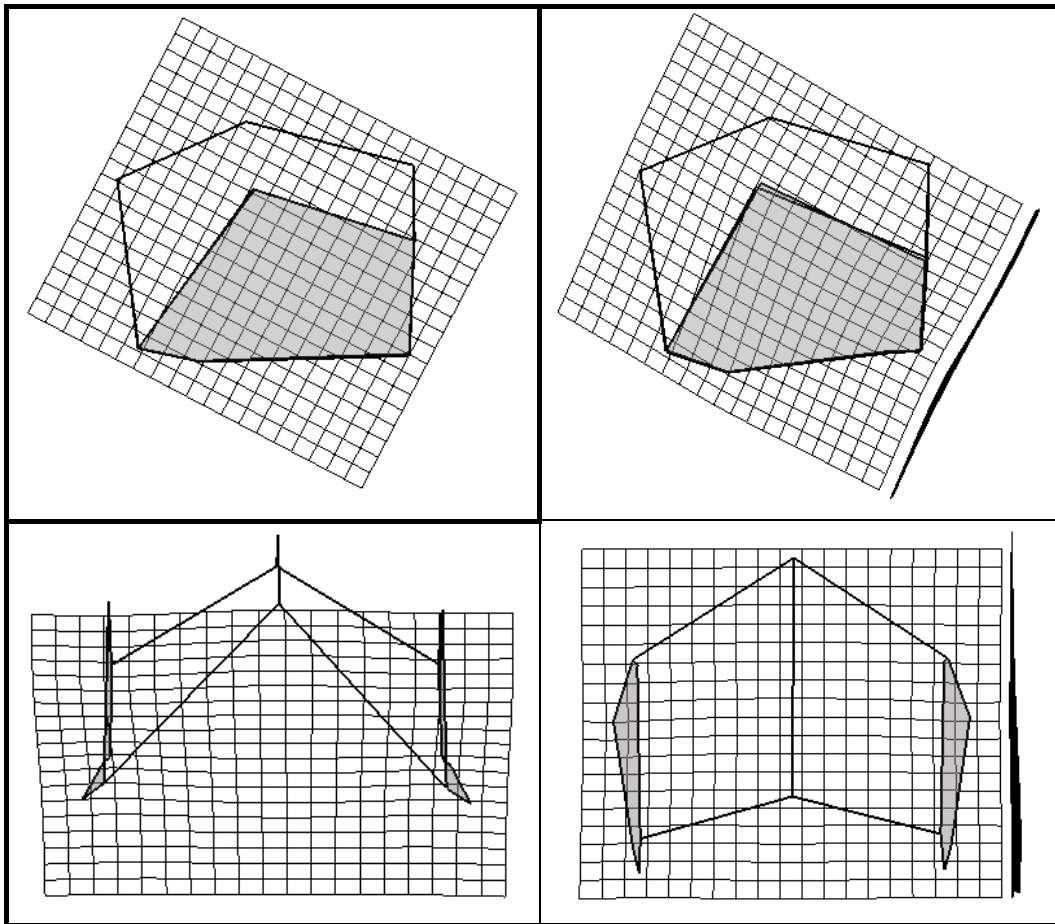


Figure 212 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les *Homo sapiens* préhistoriques ont une modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale (figure 213) plus haute et plus compacte que celle des *Homo heidelbergensis*. Ceci est dû à un bregma, un sagittum (plus fort mouvement) et un lambda plus haut dans l'espace. Le lambda ne subit pas de mouvement antérieur, seulement un positionnement légèrement plus haut, alors que les astérions se situent plus antérieurement, plus bas et sont plus internes. Ceci contribue à donner un angle astérion – lambda – astérion plus faible. Le tracé de la suture pariéto-temporale a chez les *Homo sapiens* préhistoriques une forme de S incliné sur la droite (kroptaphion au-dessus du sphénion). L'incisure pariétale est plus interne. Les stéphanions sont situés plus bas que les bosses pariétales et sont plus externes que chez les *Homo heidelbergensis*. En projection frontale les segments sphénion – stéphanion sont presque verticaux ce qui n'est pas le cas pour les *Homo heidelbergensis*. La facette latérale de la voûte bipariétale est verticalisée, phénomène constaté en vue supérieure où l'écaille

supérieure du pariétal recouvre presque l'écaille latérale (positionnements plus externes des bosses pariétales par rapport au sphénion et à l'astérion).

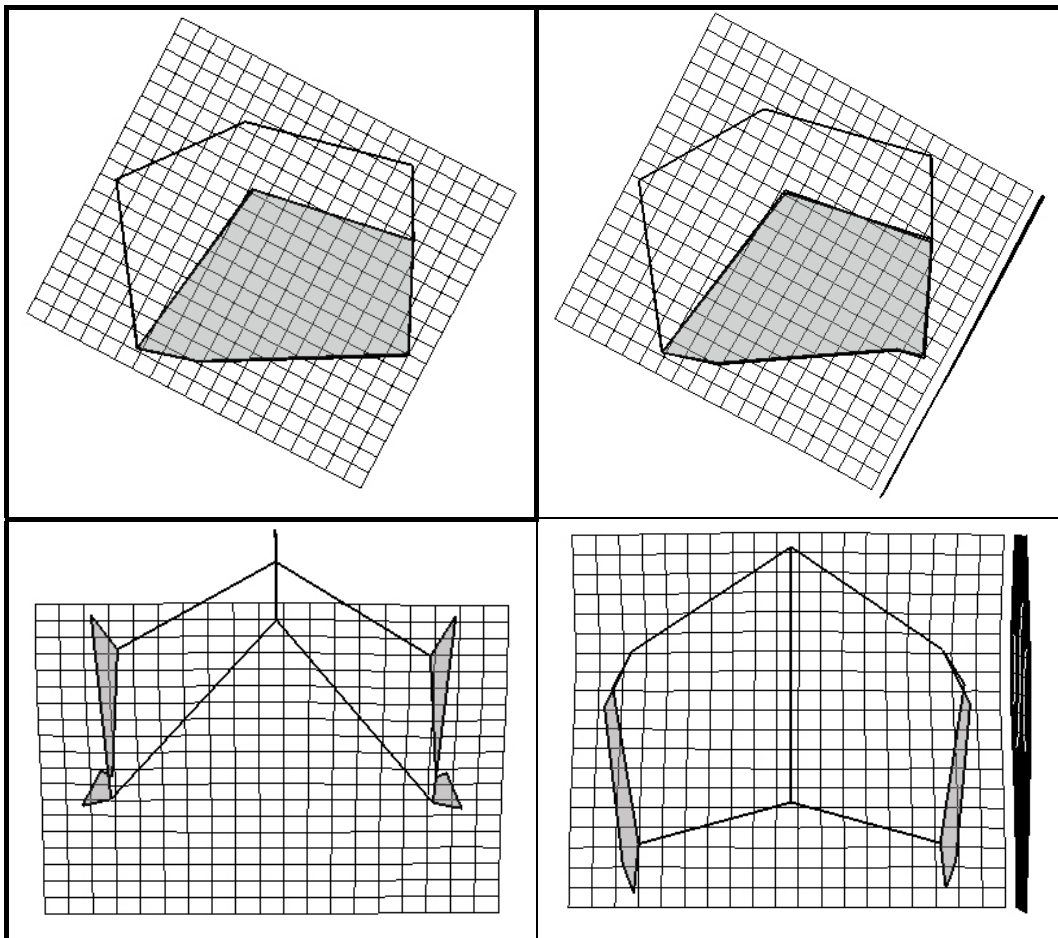


Figure 213 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo heidelbergensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les différences entre les *Homo erectus* et les *Homo sapiens* préhistoriques sont nombreuses et marquées au niveau de la voûte bipariétale (figure 214). La voûte sagittale des *Homo sapiens* est bien plus haute que celle des *Homo erectus* qui ont une forme basse et allongée. La voûte des *Homo erectus* est plus élargie que celle des *Homo sapiens* au niveau de la suture pariéto-temporale. La largeur bilatérale diminue au niveau de la base et augmente au niveau supérieur chez les *Homo sapiens* préhistoriques. La largeur bistéphanique, inférieure aux autres chez les *Homo erectus* est presque égale à la largeur biastérique chez les *Homo sapiens* préhistoriques et est même supérieure à celle-ci chez les spécimens historiques. Ce mouvement des stéphaniens est accompagné d'une extériorisation des bosses pariétales chez

ces *Homo sapiens* préhistoriques. A la différence des *Homo erectus*, ces individus ont une écaille supérieure de plus en plus au dessus de l'écaille latérale qui passe d'une orientation oblique interne à verticale. Le tracé de la suture pariéto-temporale a chez les *Homo sapiens* préhistoriques une forme de S incliné sur la droite (kroptaphion positionné au-dessus du sphénion au lieu d'en-dessous chez les *Homo erectus*). L'incisure pariétale est plus interne.

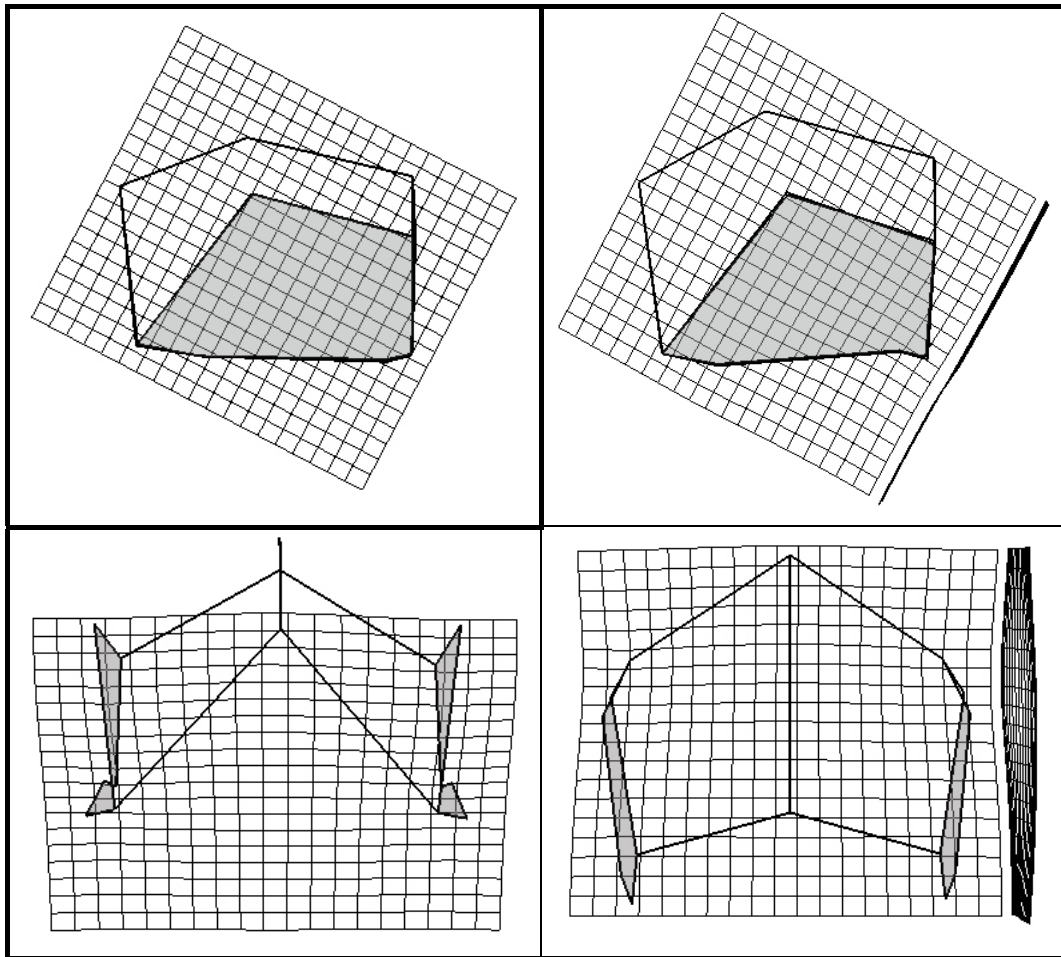


Figure 214 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les différences entre les *Homo neanderthalensis* et les *Homo sapiens* préhistoriques sont nombreuses et correspondent à des différences structurelles précises. Les *Homo sapiens* préhistoriques étudiés présentent une voûte bipariétale (figure 215) plus haute sagittalement (sagittum) et plus longue (lambda plus postérieur, mais plus bas). Les stéphanions des *Homo sapiens* préhistoriques sont plus internes et plus haut en vue frontale. Les bosses pariétales

sont plus antérieures (en avant du sagittum en projection sagittale) et plus externes en proportions. Au niveau de la suture pariéto-temporale, les sphénions des Néandertaliens se situent au même niveau que les kryptophions alors que ceux-ci se situent au-dessus des sphénions chez les *Homo sapiens* préhistoriques. Les astérions, ainsi que les incisures pariétales sont plus internes chez les *Homo sapiens* préhistoriques et moins basses que celles des Néandertaliens.

Les largeurs inférieures de la voûte bipariétales sont moindres chez les *Homo sapiens* préhistoriques que chez les Néandertaliens, ce qui donne avec des bosses pariétales plus externes chez ces *Homo sapiens* préhistoriques une modélisation plus anguleuse, plus pentagonale en vue frontale que celle des Néandertaliens.

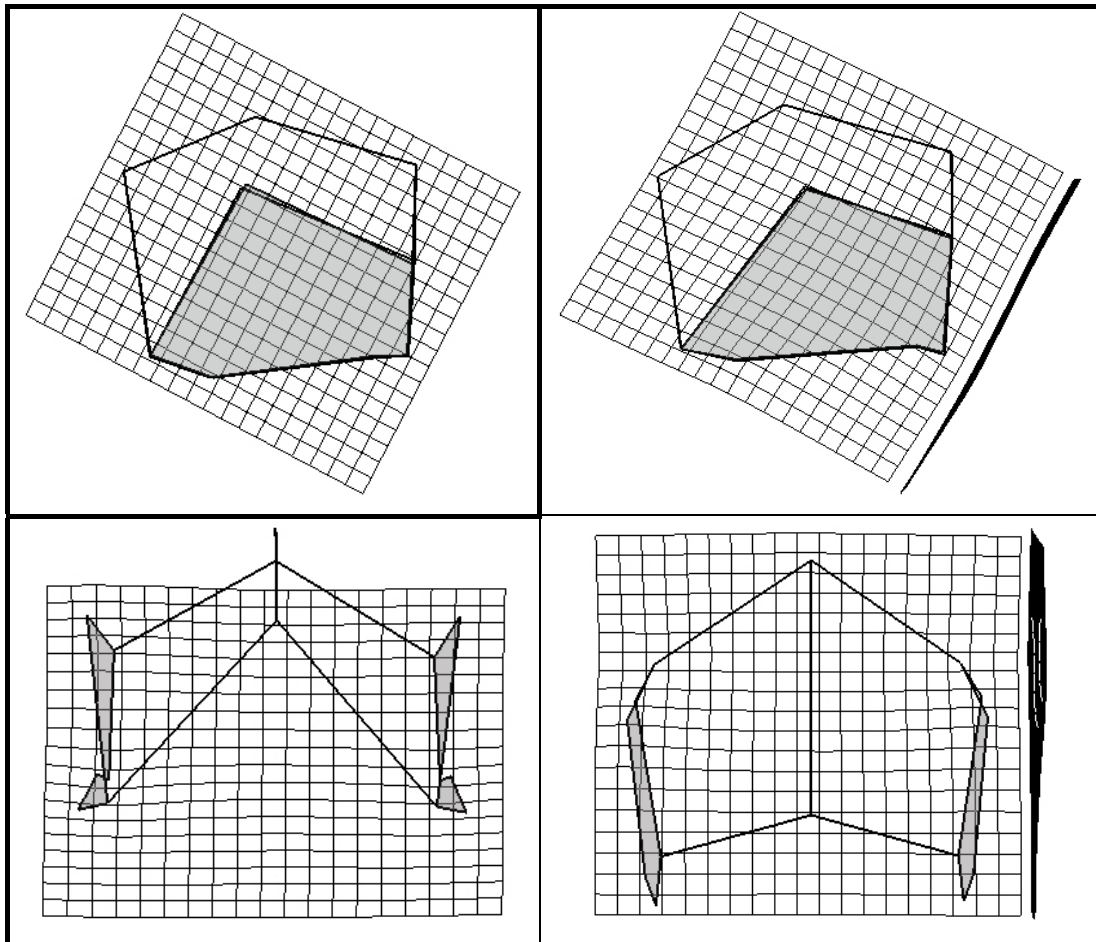


Figure 215 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

VII.2.5 Modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit des espèces du genre *Homo*

Nous présentons (figure 216) le résultat de l'ACP réalisée sur les modélisations tridimensionnelles de l'os pariétal droit pour le genre *Homo* (noms en figures 217 et 218).

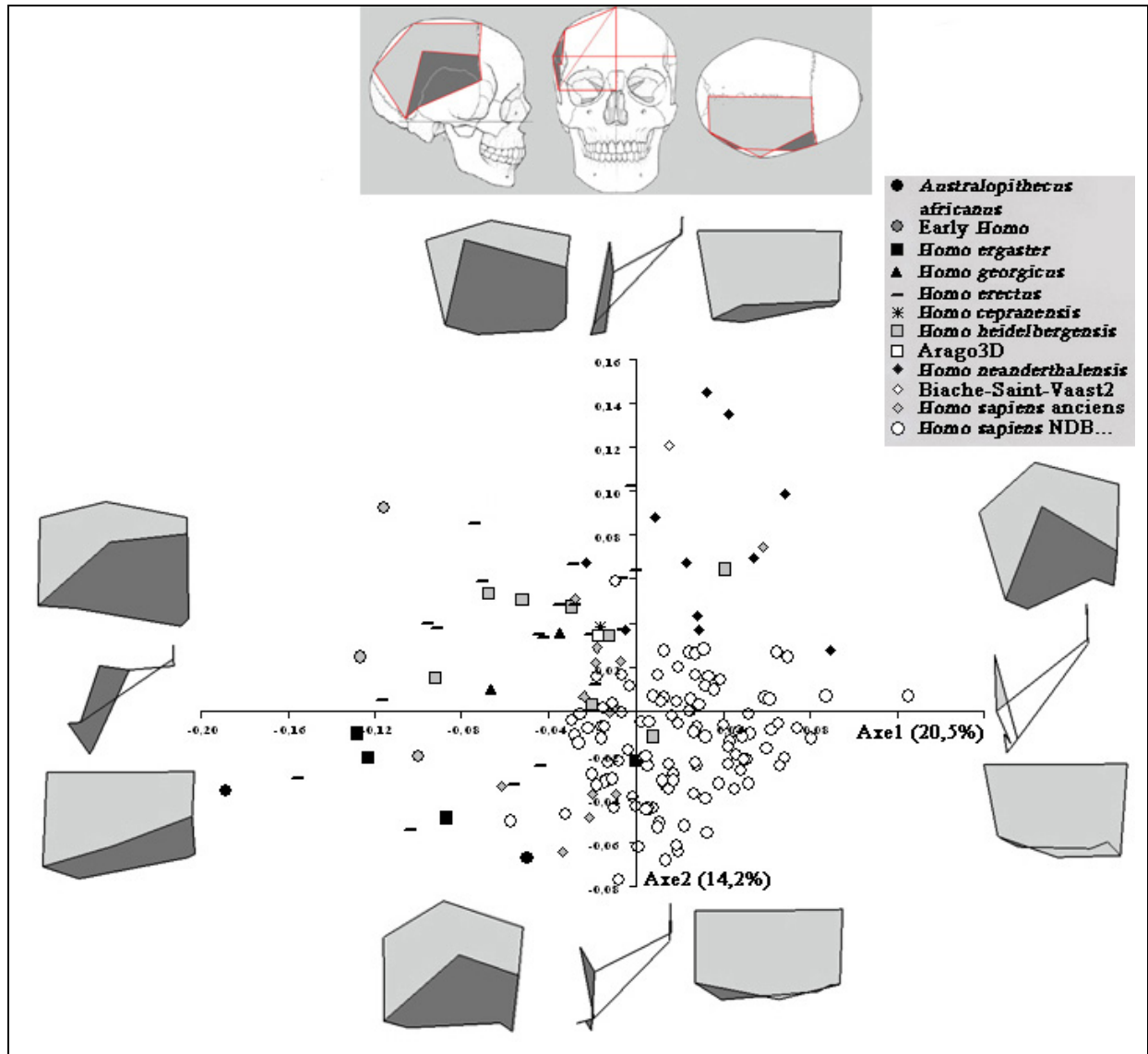


Figure 216 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit du genre *Homo*.

L'axe 1 explique 20,5% de la variance totale des individus étudiés contre 14,2% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent 37,5% de la variance totale (graphique 12).

Nous passons de la valeur maximale de l'axe 1 (*Homo sapiens* historiques) à sa valeur minimale (Sts 5) en relevant et en déplaçant les stéphanions vers l'intérieur dans l'espace, en avançant le bregma et en abaissant le sagittum. Les bosses pariétales sont plus basses et plus

internes mais leur position relative par rapport à la suture sagittale reste identique. La suture pariéto-temporale modélisée change en passant depuis la valeur maximale de l'axe 1 d'une forme de S incliné vers la droite à une forme de Z incliné vers la gauche pour les valeurs minimales de l'axe 1. Ceci est dû à un kryptaphion plus haut et en retrait qui va s'abaisser et s'avancer, et à une incisure pariétale basse et antérieure qui va être élevée en allant vers les valeurs minimales de l'axe 1. Le sphénion devient plus antérieur et l'astérion plus postérieur.

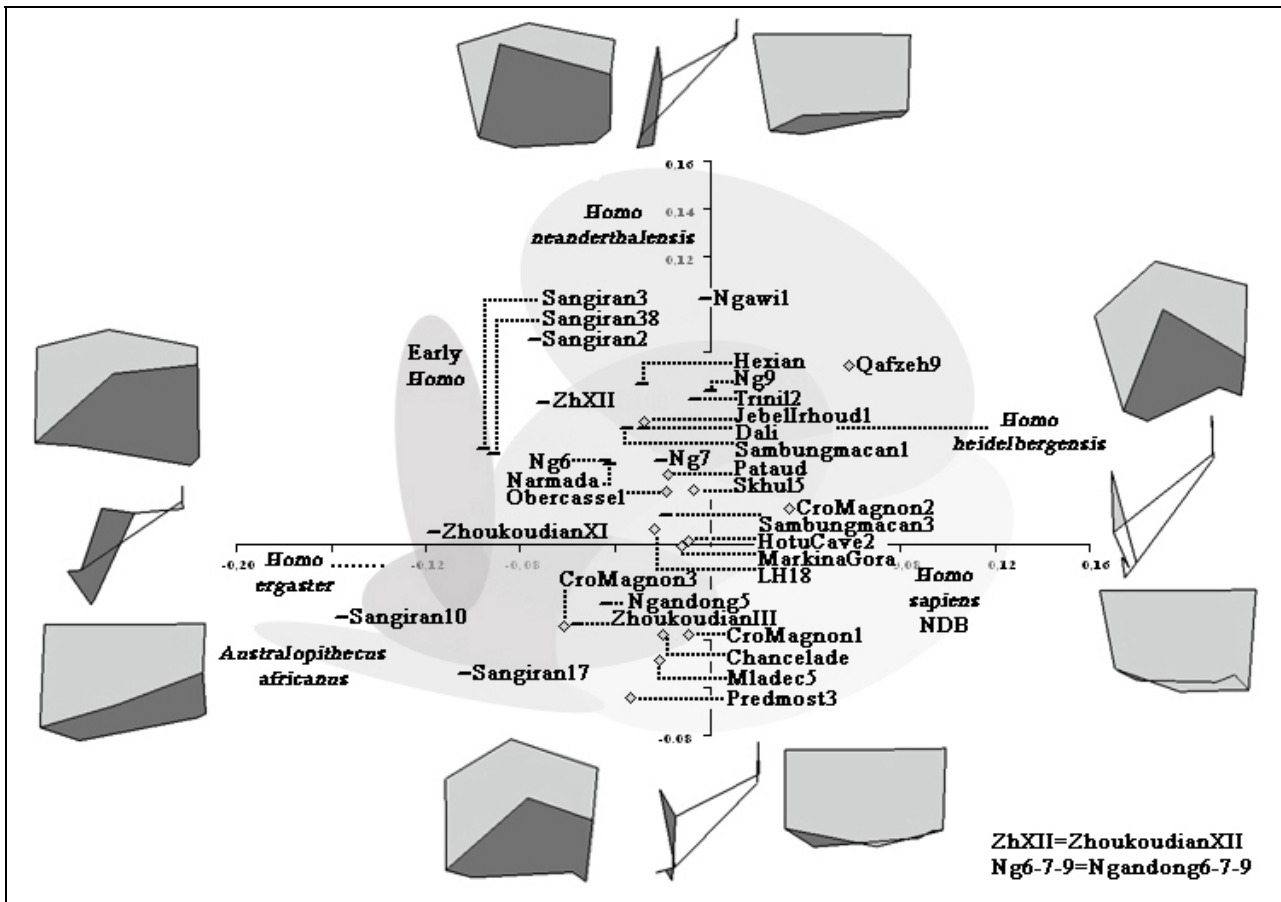


Figure 217 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit du genre *Homo*; Noms des individus.

Nous constatons en allant de la valeur maximale de l'axe 2 (Amud 1) à sa valeur minimale (*Homo sapiens* historiques) que la bosse pariétale devient plus antérieure. Ce mouvement s'accompagne de l'abaissement du lambda dans le plan sagittal. Le sphénion est situé plus bas et le stéphanion se déporte légèrement à l'extérieur.

Situé à l'extrémité négative de l'axe 1 (-0,19) avec une valeur de -0,03 sur l'axe 2, la conformation spatiale de l'os pariétal droit de Sts 5 est allongé antéro-postérieurement avec une facette latérale importante, oblique vers l'avant et vers le haut.

L'angulation bregma – sagittum –lambda est faible. En vue latérale les segments lambda – astérion et bregma – stéphanion – sphénion sont presque verticaux avec une légère avancée du stéphanion par rapport au bregma et du sphénion par rapport au stéphanion. La ligne pariéto-temporale forme un Z incliné vers la gauche.

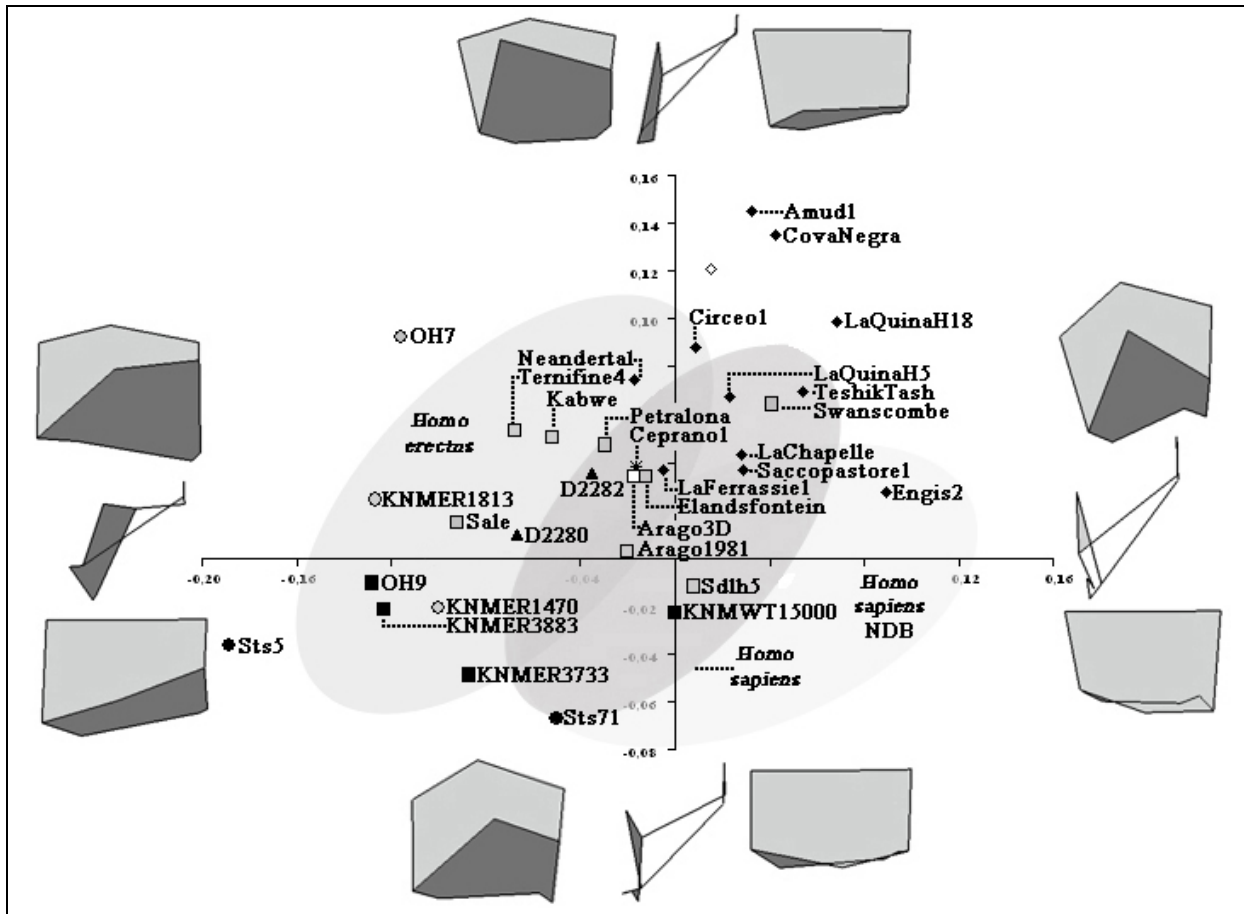


Figure 218 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit du genre *Homo*; Noms des individus - bis.

Nous trouvons ensuite la forme consensus des premiers *Homo* avec une faible variation de ceux-ci le long de l'axe 1 (-0,13 pour KNM-ER 1813 à -0,10 pour KNM-ER 1470). La différence entre eux se fait au niveau de l'axe 2 (-0,04 pour KNM-ER 1470 à +0,10 pour OH 7), les trois spécimens étant assez dispersés. Le pariétal droit de OH 7 diffère des autres premiers *Homo* par une bosse pariétale postérieure, un lambda plus haut ainsi qu'un kryptaphion plus bas.

La forme consensus suivante correspond à l'espèce *Homo ergaster*. Celle-ci s'étend de -0,13 à -0,08 sur l'axe 1 et de -0,05 à -0,01 sur l'axe 2. La suture pariéto-temporale modélisée est presque rectiligne en vue latérale. KNM-WT 15000 est plus décalé (0 ; -0,02). Alors que la

forme consensus des autres spécimens présente en vue frontale un triangle sphénion – stéphanion – bregma de type isocèle avec le stéphanion à son sommet, KNM-WT 15000 a, avec un stéphanion plus bas et plus externe (axe 1), un segment sphénion – stéphanion presque vertical. Pour tous les *Homo ergaster* le lambda est inférieur au bregma (dans notre plan de comparaison) mais le lambda de KNM-WT 15000 est plus bas que celui des adultes. Ses différences avec les autres spécimens de cette espèce pouvant être liée à l'âge, nous conservons cet individu à titre indicatif.

Nous avons ensuite les *Homo erectus* sur l'axe 1. La population est dispersée avec des valeurs allant de -0,17 (Sangiran 10) à 0 (Ngandong 9) sur l'axe 1 et de -0,05 (Sangiran 17) à +0,10 (Ngawi 1) sur l'axe 2. Nous ne pouvons pas distinguer les différents individus suivant leur localisation géographique (Chine, Indonésie, Inde). Nous considérons donc la population dans son ensemble.

L'individu d'aspect le plus archaïque (valeur la plus basse sur l'axe 1) est Sangiran 10. Celui-ci est le plus proche de Sts 5 sur l'axe 1. Nous avons ensuite Zhoukoudian XI et Sangiran 17. Les individus présentant les plus fortes valeurs sur l'axe 1 sont Ngawi 1, Ngandong 9 et Trinil 2. La répartition des individus suit un axe oblique allant des valeurs (-0,10 ; -0,04) à (0 ; +0,10). Le long de cet axe les individus passent d'une forme archaïque proche de Sts 5 avec une conformation rectangulaire de l'écaille en vue latérale à une forme plus évasée vers le haut avec Ngawi 1. Ceci correspond à une longueur bregma – lambda supérieure à la longueur astérion – sphénion pour cet individu. Ngawi 1 a une suture pariéto-temporale en « cuvette » avec une incisure pariétale et un kryptaphion placés sous la ligne astérion – sphénion. Il y a aussi variation de la position de l'incisure pariétale. La bosse pariétale de Ngawi 1 est située plus postérieurement (en retrait du sagittum) et plus à l'extérieur. L'écaille latérale est moins oblique, avec en vue frontale deux segments sphénion – stéphanion et astérion – bosse pariétale verticaux. Seul le kryptaphion dépasse du plan formé par ces deux segments.

La forme consensus des *Homo heidelbergensis* est proche de celle des *Homo erectus* et l'est encore plus de celle des *Homo georgicus*. Les deux spécimens découverts à Dmanissi sont séparés de 0,04 sur l'axe 1 et de 0,03 sur l'axe 2 avec une conformation spatiale plus étirée du bord inférieur à la suture sagittale pour D2282.

Les *Homo heidelbergensis* sont surtout dispersés le long de l'axe 1 (-0,10 pour Sale à +0,01 pour Sima de los Huesos 5) contre une répartition allant de -0,01 (Sima de los Huesos 5) à +0,05 (Ternifine 4) sur l'axe 2.

Swanscombe est écarté suivant les axes 1 et 2. Il est possible d'objecter l'écart de OH 7 avec les autres premiers *Homo* mais la différence ne se fait que suivant l'axe 2 ce qui n'est

pas le cas avec Swanscombe. Nous ne le prenons donc pas en compte dans la population des *Homo heidelbergensis* pour cette analyse.

Les *Homo heidelbergensis* considérés recouvrent les configurations tridimensionnelles des *Homo erectus*, *Homo sapiens* préhistoriques et historiques. Le passage de la forme de Sale à Sima de los Huesos 5 nécessite une descente du stéphanion en vue frontale et une bosse pariétale plus externe. La forme consensus a une facette latérale verticale en vue frontale, et en vue latérale un os pariétal évasé vers le haut. La suture pariéto-temporale a un tracé en S infléchi basculé vers la droite dû fait d'un kryptaphion plus haut.

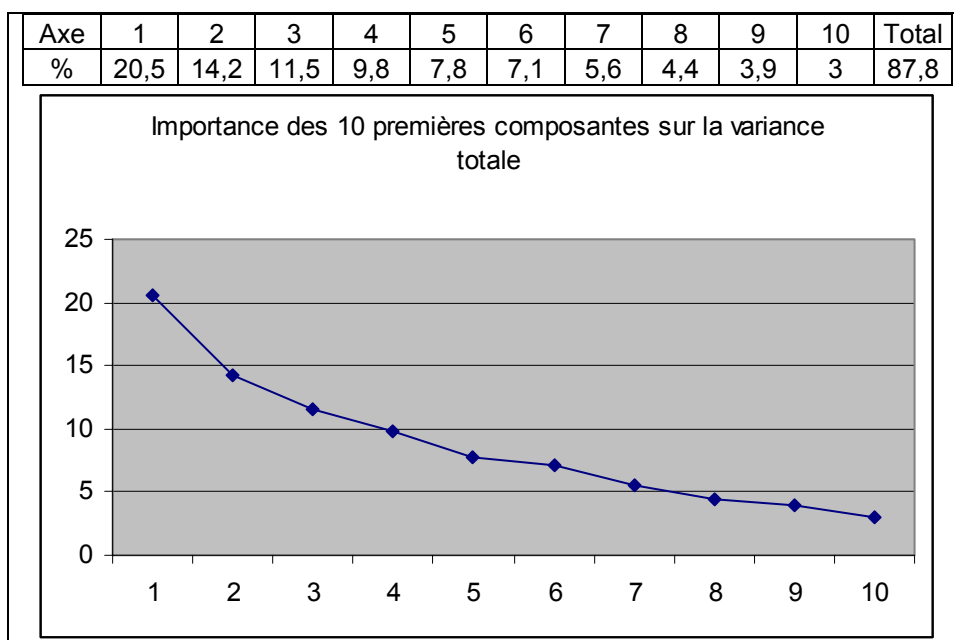
Les *Homo neanderthalensis* sont homogènes le long de l'axe 1 (-0,02 pour Neandertal à +0,04 pour Cova Negra) et plus différenciés le long de l'axe 2 (+0,04 pour La Ferrassie 1 à +0,145 pour Amud1) avec une écaille plus ouverte vers le haut en vue latérale et une bosse pariétale plus postérieure. Les individus juvéniles sont plus distants le long de l'axe 1 (+0,06 pour Teshik Tash 1 à +0,09 pour Engis 2) et ont une moindre dispersion le long de l'axe 2. Nous ne les présentons qu'à titre indicatif en raison de leur âge.

Le pariétal droit de notre proposition de reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2 présente une conformation tridimensionnelle comprise entre celles de trois Néandertaliens : Amud 1, Cova Negra et Monte Circeo 1.

Les configurations tridimensionnelles des *Homo sapiens* préhistoriques s'avèrent plus dispersées que celles des Néandertaliens avec une répartition suivant l'axe 1 allant de -0,06 pour Cro-Magnon 3 à +0,06 pour Qafzeh 9 et pour l'axe 2 allant de -0,06 pour Predmost 3 à +0,07 pour Qafzeh 9. Comme pour les *Homo erectus*, ces *Homo sapiens* préhistoriques sont répartis en groupes dont les limites maximales sont éloignées mais qui sont relativement en contact entre eux. Ainsi Cro-Magnon 2 est proche de Skhul 5 et de Hotu Cave 2 suivant l'axe 2, et Qafzeh 9 est proche de Cro-Magnon 2 suivant l'axe 1.

A l'exception de Qafzeh 9, Jebel Irhoud 1, Cro-Magnon 3 et Pataud, toutes les configurations tridimensionnelles des *Homo sapiens* préhistoriques se confondent avec celles des *Homo sapiens* historiques. Cette population se répartie entre les valeurs -0,06 et +0,13 sur l'axe 1 et -0,08 et +0,06 sur l'axe 2 et présente une répartition oblique allant de (-0,06 ; +0,05) à (+0,13 ; +0,01). Suivant cet axe oblique nous passons d'individus avec un pariétal vertical en vue latérale à une configuration plus pentagonale (segment astérion – sphénion plus court que le segment bregma – lambda, et sagittum au sommet). Cette conformation a en vue frontale une écaille latérale oblique vers l'extérieur du fait d'un positionnement plus externe et plus bas du stéphanion.

L'Analyse en Composantes Principales portant sur le pariétal droit est celle qui présente les résultats les plus complexes en raison d'un mélange plus important des populations. Cette ACP est celle présentant la plus faible proportion de la variance totale pour l'axe 1.



Graphique 12 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle du pariétal droit du genre *Homo*.

Nous avons orienté toutes les vues de manière à avoir une suture sagittale plane intégrée dans une des trois dimensions (figure 219).

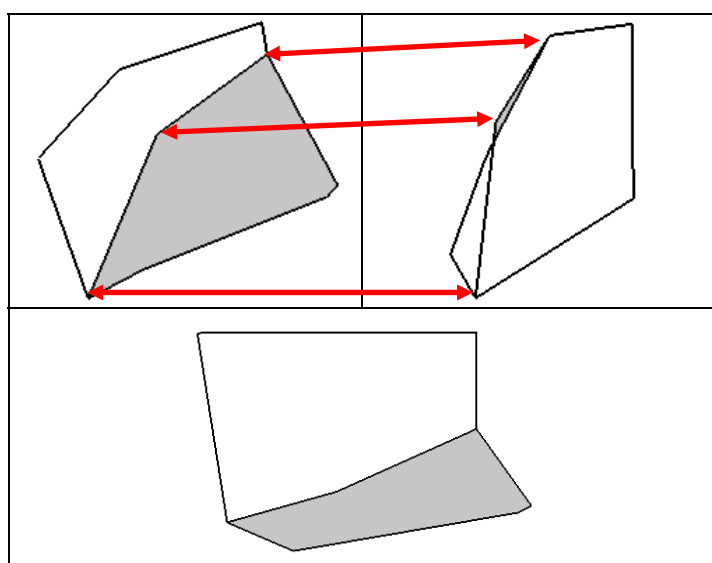


Figure 219 : Modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit; Projections dans le plan sagittal, frontal et transversal.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des premiers *Homo* et des *Homo ergaster*

Les différences entre les spécimens des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* sont faibles (figure 220).

Les deux groupes présentent un sagittum peu élevé par rapport au segment bregma-lambda. L'incisure pariétale et l'astérion sont plus distants de la suture sagittale en projection transversale que le kryptaphion et le sphénion. La modélisation de la suture sagittale est presque linéaire en projection sagittale. Le stéphanion est plus proche du bregma que du sphénion.

Cependant la configuration tridimensionnelle des *Homo ergaster* paraît plus « archaïque » avec un pariétal droit modélisé plus allongé antéro-postérieurement. Le stéphanion des *Homo ergaster* est plus interne et positionné plus haut. L'astérion est plus postérieur.

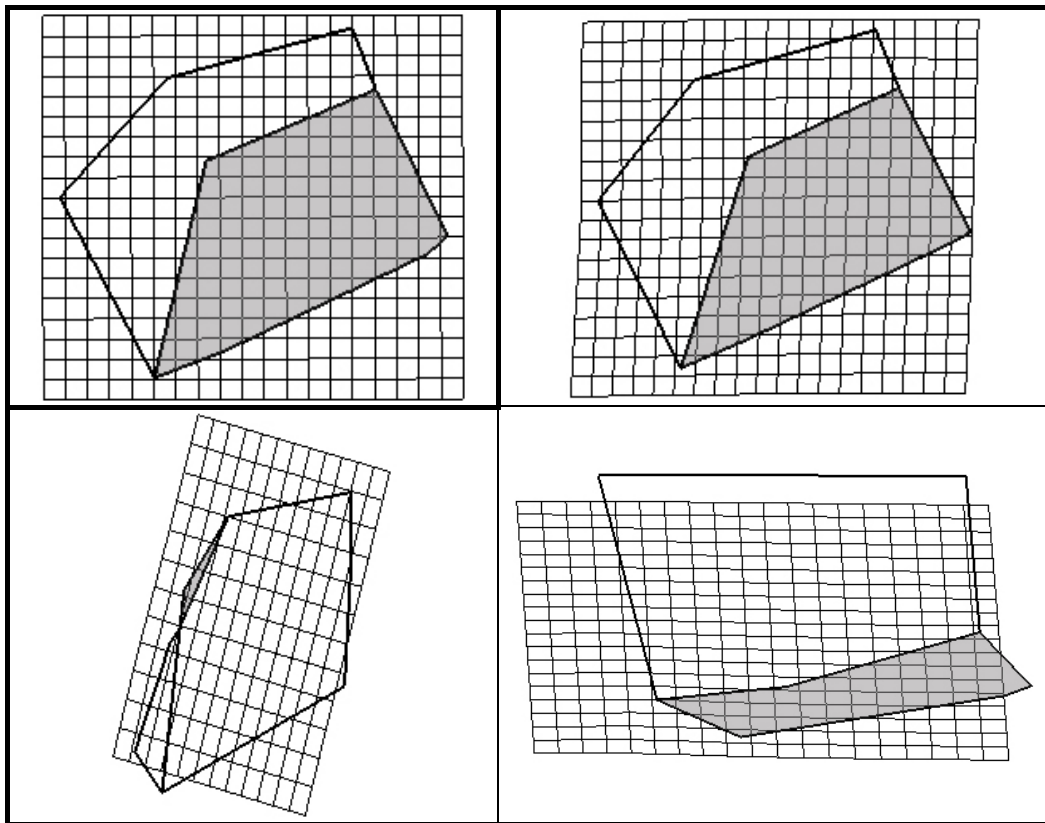


Figure 220 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des premiers *Homo* et des *Homo georgicus*

Les différences entre les premiers *Homo* et la forme consensus de D2280 et de D2282 sont nombreuses (figure 221). Le stéphanion des *Homo georgicus* est plus bas et plus externe en vue latérale. L'astérion est plus antérieur et plus bas. Ceci permet d'expliquer la forme moins étirée antéro-postérieurement. Le mouvement vers le bas et l'avant de l'astérion permet d'avoir une suture lambdatique plus longue, donnant ainsi un pariétal plus étiré vers le haut. Nous constatons en vue latérale l'abaissement de l'incisure pariétale par rapport au reste de l'écaille. En vue frontale la bosse pariétale est plus haute par rapport au plan bregma – lambda – astérion.

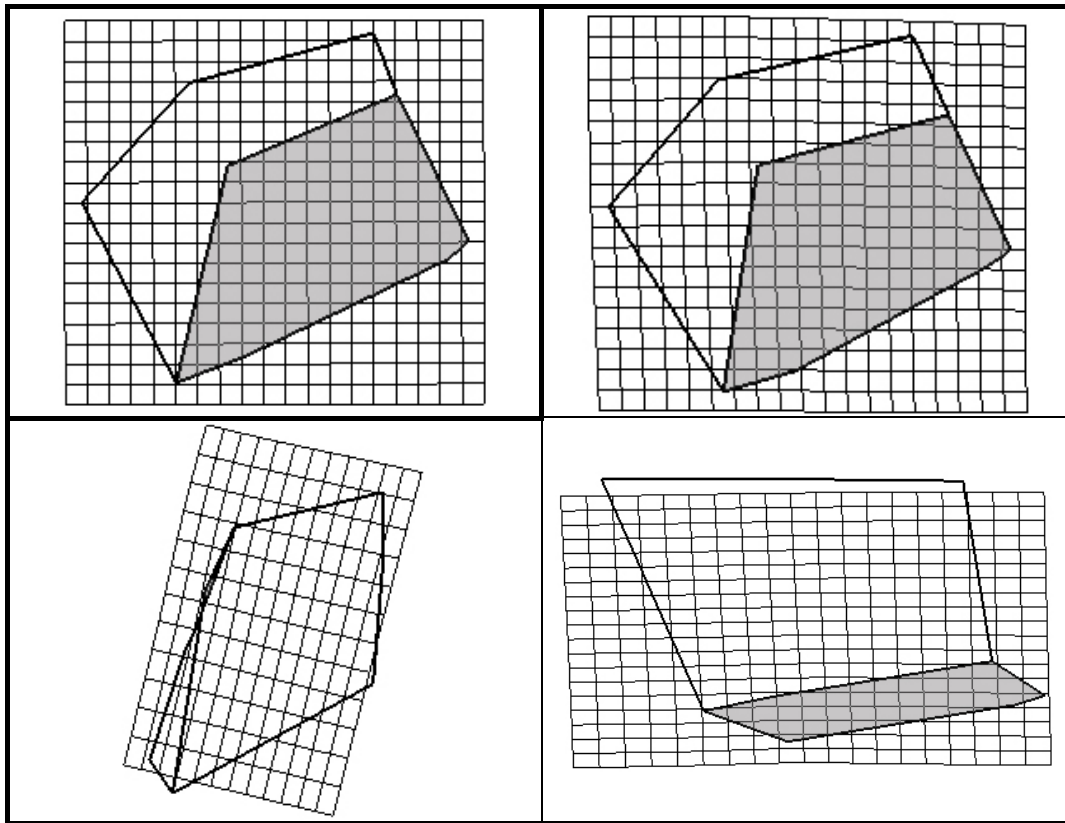


Figure 221 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des premiers *Homo* et des *Homo georgicus* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des *Homo ergaster* et des *Homo cepranensis*

Ceprano 1 (figure 222) a une modélisation tridimensionnelle du pariétal droit plus courte antéro-postérieurement en proportion. L'astérion de Ceprano 1 est très avancé et plus bas que celui de la forme consensus des *Homo ergaster*. L'incisure pariétale est plus basse par

rapport à l'axe astérion – sphénion. La bosse pariétale est plus haute et plus externe par rapport au plan sagittal (bregma – sagittum – lambda). Le sagittum est plus haut sur la suture sagittale.

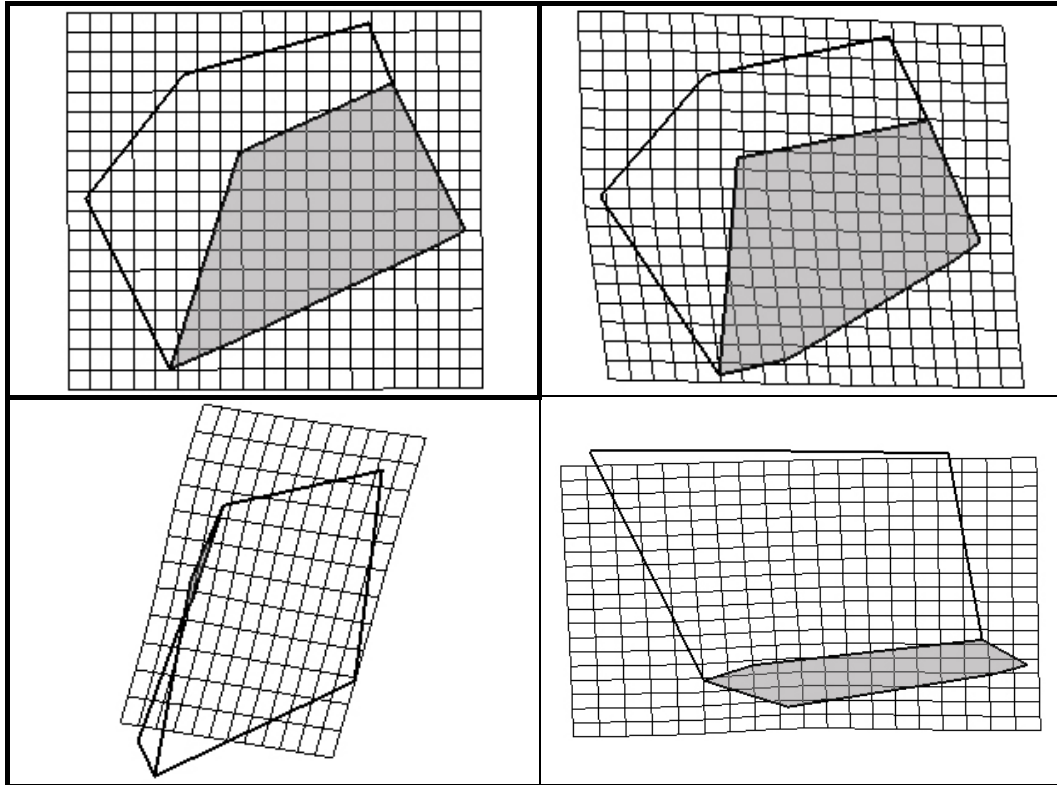


Figure 222 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des *Homo ergaster* et des *Homo cepranensis* en TPS.

En raison de la grande proximité des formes consensus des *Homo georgicus*, *Homo erectus* et *Homo heidelbergensis*, nous ne comparons désormais qu'une seule des 3 espèces avec les autres. Nous rappelons toutefois la très grande variabilité de la forme du pariétal droit chez les *Homo erectus*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des *Homo ergaster* et des *Homo heidelbergensis*

Les déformations nécessaires (figure 223) pour passer de la forme consensus des *Homo ergaster* à celle des *Homo heidelbergensis* (ou *Homo georgicus* ou *Homo erectus*) correspondent à celles observées lors du passage des *Homo ergaster* aux *Homo cepranensis* mais à un niveau moindre. Le pariétal droit est en effet plus compact antéro-postérieurement mais est moins court que celui de Ceprano 1 (voir comparaison suivante). La forme consensus des *Homo heidelbergensis* a un contour ouvert vers le haut en vue latérale et non plus

rectangulaire du fait d'une longueur astérion – sphénion inférieure à la corde bregma – lambda.

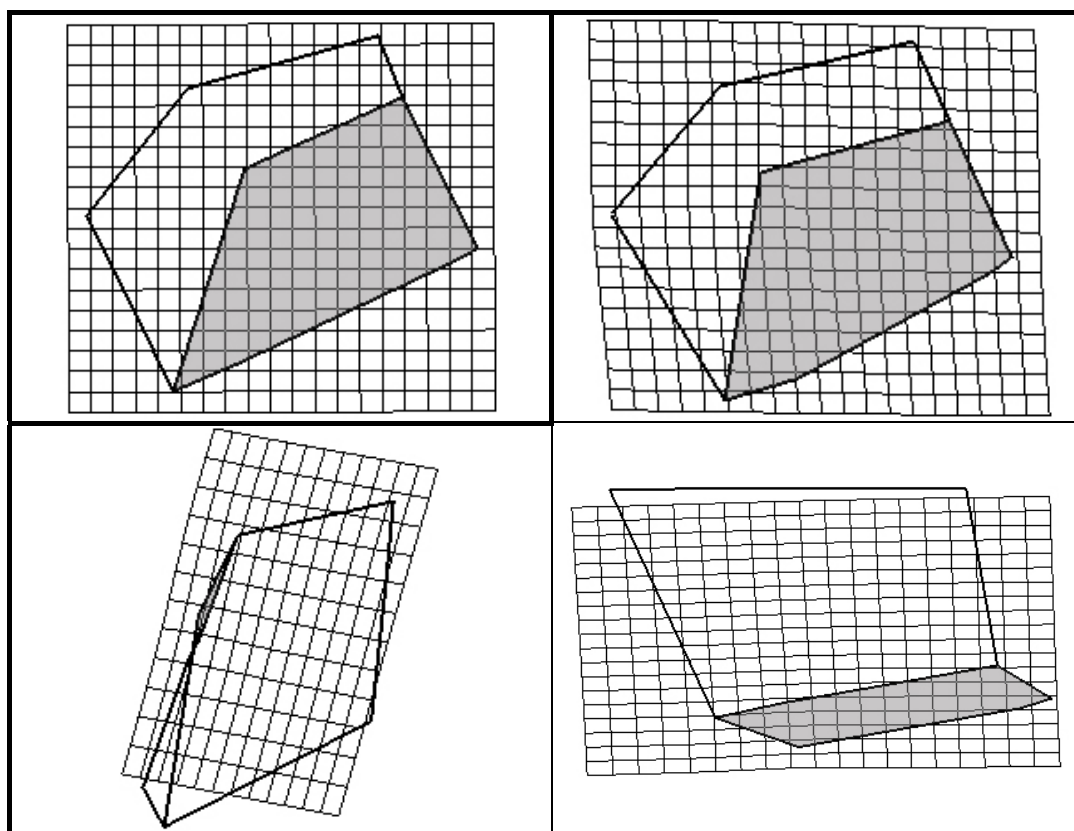


Figure 223 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des *Homo ergaster* et des *Homo heidelbergensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit de *Homo cepranensis* et des *Homo heidelbergensis*

La forme consensus des *Homo heidelbergensis* est très similaire à celle de Ceprano 1. Les *Homo heidelbergensis* ont un pariétal droit légèrement plus long en raison d'un astérion plus postérieur (figure 224). La bosse pariétale de ces individus est plus antérieure par rapport à la suture lambdatique. L'incisure pariétale est plus haute que celle de Ceprano 1 chez qui l'angulation astérion – incisure pariétale – kryptaphion est plus marquée. Le stéphanion des *Homo heidelbergensis* est plus haut et plus interne par rapport au plan sagittal (lambda – sagittum – bregma).

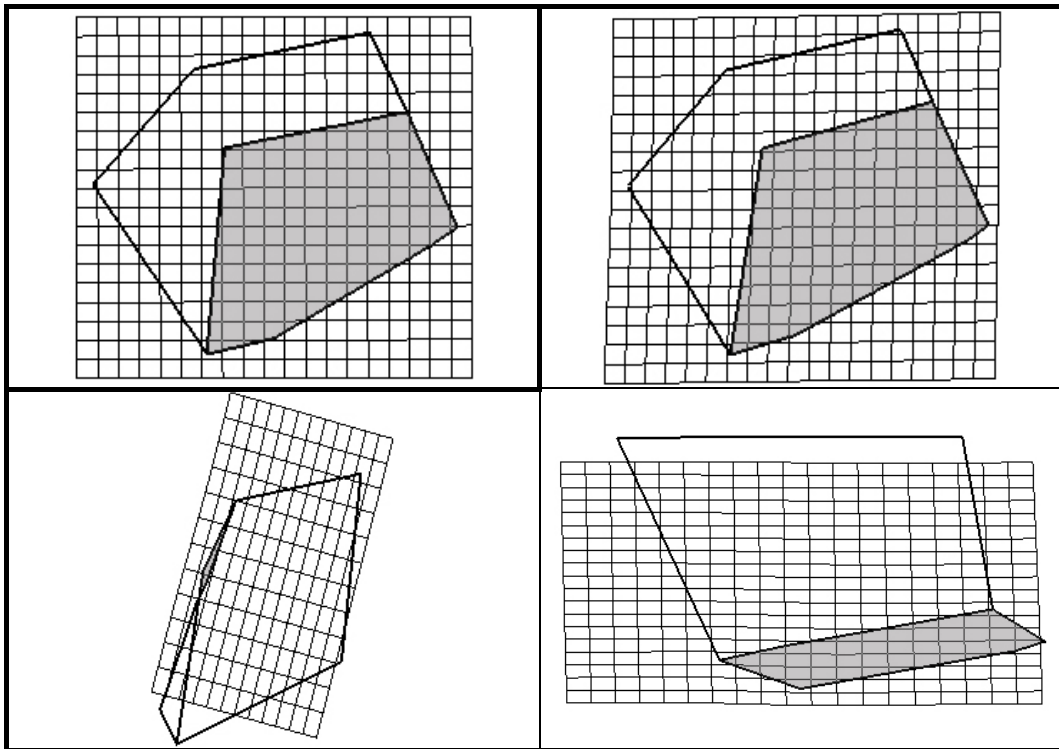


Figure 224 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits d'*Homo cepranensis* et des *Homo heidelbergensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit de *Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis*

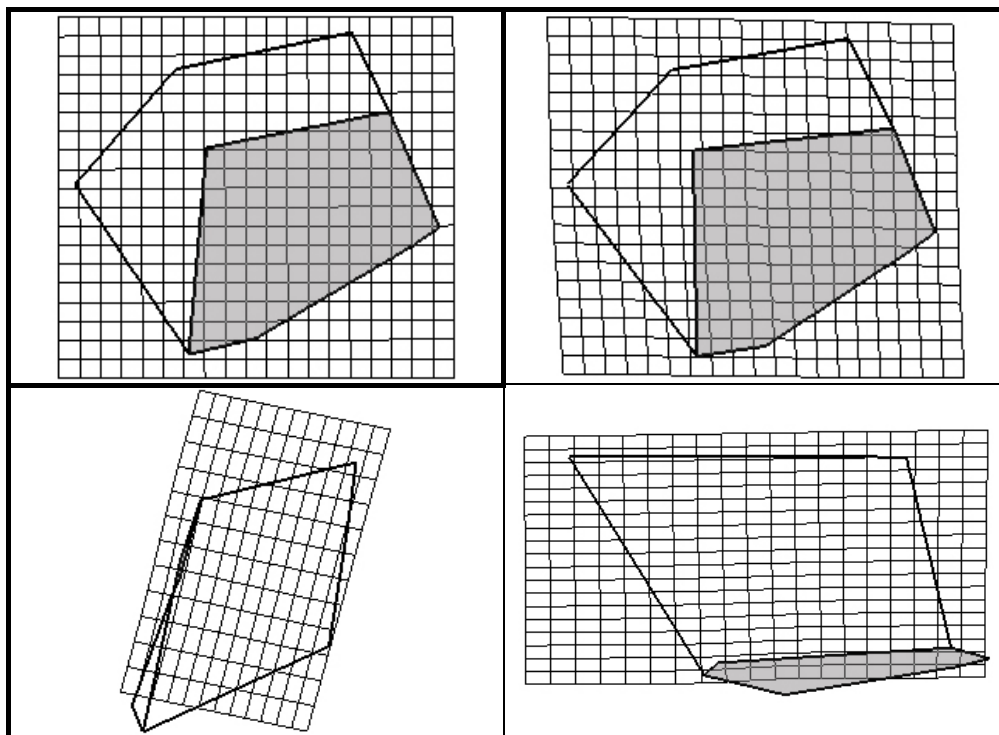


Figure 225 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits d'*Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Les configurations tridimensionnelles consensus des deux espèces sont similaires. Ceprano 1 a une conformation plus « archaïque » que celle des Néandertaliens (figure 225). L'incisure pariétale des Néandertaliens est encore plus distincte de l'axe astérion – sphénion, la bosse pariétale est plus postérieure par rapport au sagittum, le stéphanion est positionné plus bas et est plus externe. Le pariétal n'a plus une forme rectangulaire mais ouverte vers le haut (longueur astérion – sphénion inférieure à la longueur bregma – lambda).

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit de *Homo cepranensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les *Homo sapiens* préhistoriques ont un os pariétal droit (modélisation) plus allongé que celui de Ceprano 1 avec un astérion plus postérieur (figure 226). La bosse pariétale ainsi que le stéphanion sont plus externes par rapport au plan sagittal (bregma – sagittum – lambda). Le kryptaphion est plus haut que le sphénion par rapport à l'axe astérion – sphénion. Le sagittum est situé plus haut sur la suture sagittale (angle bregma – sagittum – lambda supérieur). L'incisure pariétale des *Homo sapiens* préhistoriques est plus haute que celle de Ceprano 1.

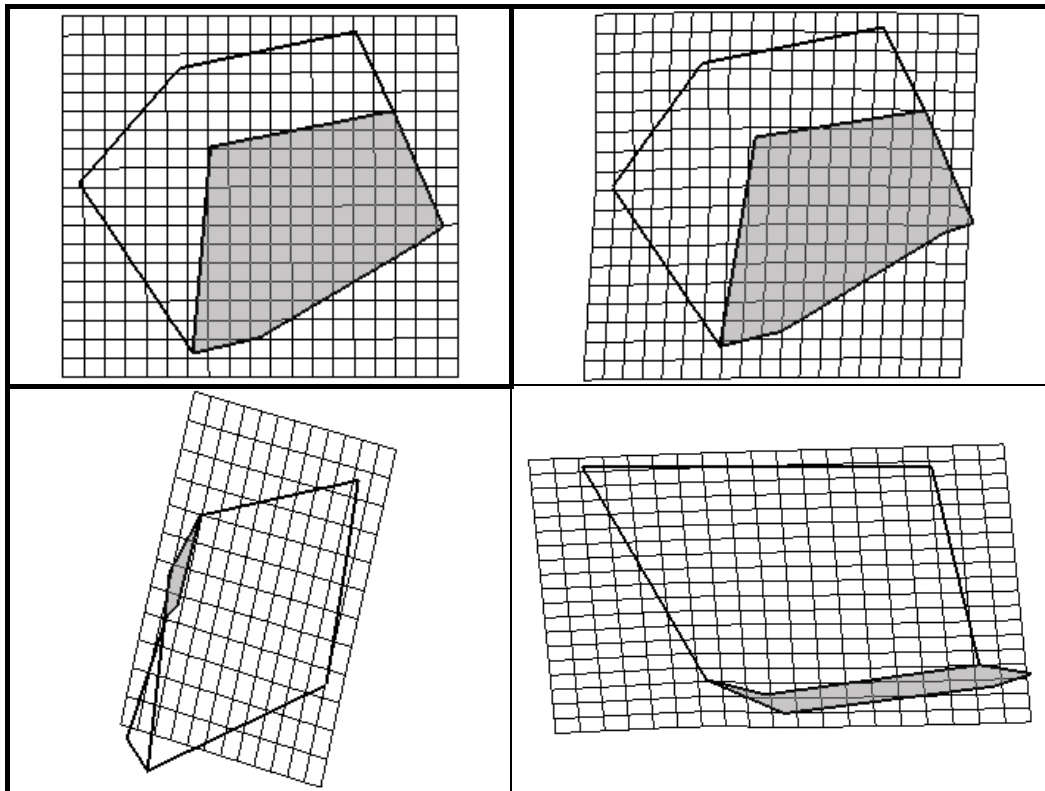


Figure 226 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits d'*Homo cepranensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques

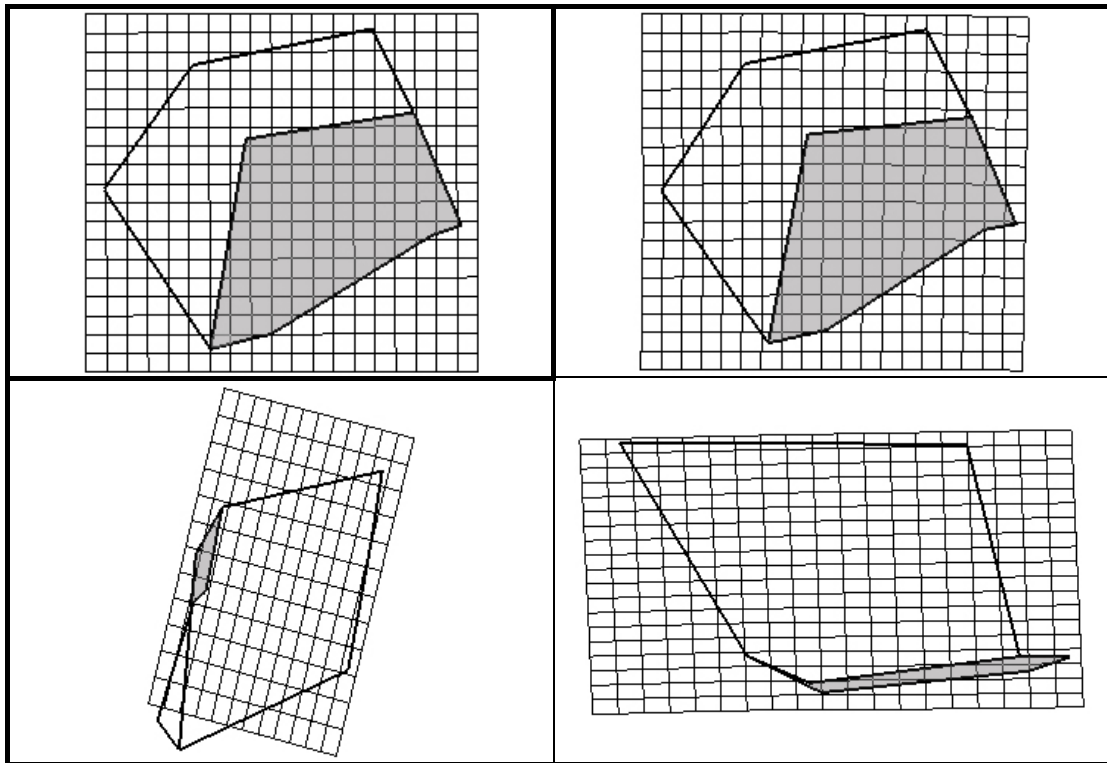


Figure 227 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques en TPS.

Les différences entre les *Homo sapiens* préhistoriques et les *Homo sapiens* historiques sont faibles avec une légère externalisation de la bosse pariétale chez les individus historiques (figure 227). Le kryptaphion est positionné plus haut. Le pariétal est autant ouvert vers le haut chez les deux groupes d'*Homo sapiens*. En vue frontale l'angle bregma – stéphanion – sphénion est presque droit pour les deux groupes, ce qui correspond à une portion latérale de l'écaille presque verticale.

Le passage des individus préhistoriques à ceux historiques ne correspondant qu'à une accentuation des caractères de la population plus ancienne, nous conservons celle-ci comme référence pour la comparaison des individus fossiles avec les *Homo sapiens*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des *Homo heidelbergensis* et des *Homo neanderthalensis*

La forme consensus néandertalienne est moins allongée que celle des *Homo heidelbergensis* (astérion plus antérieur) et a une forme pentagonale ouverte vers le haut du fait d'une longueur astérion – sphénion inférieure à la corde lambda – bregma (figure 228). La

bosse pariétale est en retrait par rapport au sagittum. Cette bosse est plus haute et plus interne en vue frontale. L'écaille latérale est plus verticale. L'incisure pariétale est plus basse.

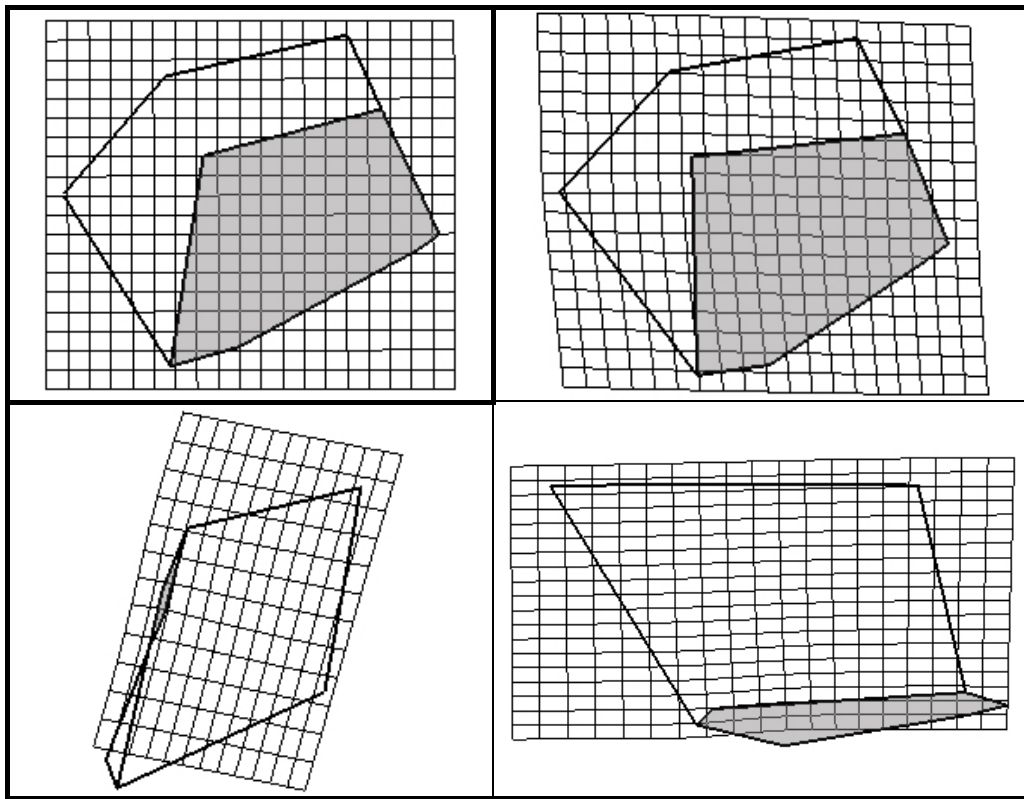


Figure 228 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des *Homo heidelbergensis* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des *Homo heidelbergensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les *Homo sapiens* préhistoriques ont une bosse pariétale plus antérieure et plus externe que celle des *Homo heidelbergensis* (figure 229). L'astérion est plus antérieur. Le kryptaphion est situé plus haut par rapport au sphénion. Au niveau de la suture sagittale le lambda est plus postérieur. Le sagittum est plus haut par rapport au bregma et au lambda. En vue frontale le stéphanion est plus bas et plus externe, ce qui correspond à une écaille latérale plus verticale.

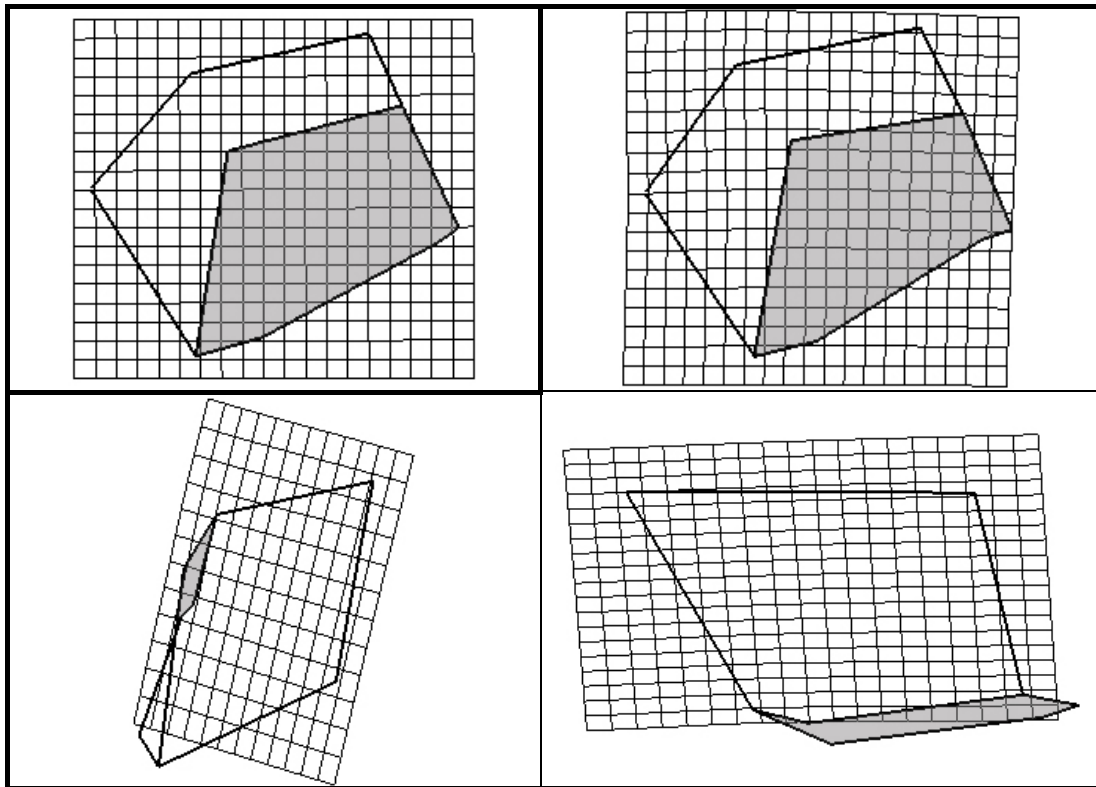


Figure 229 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des *Homo heidelbergensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles du pariétal droit des *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Les Néandertaliens et les *Homo sapiens* préhistoriques ont une configuration tridimensionnelle différente avec un os pariétal droit étiré verticalement pour les Néandertaliens contre une conformation plus allongée pour les *Homo sapiens* préhistoriques (figure 230). La bosse pariétale des *Homo sapiens* préhistoriques est plus externe, plus antérieure et plus basse que celle des Néandertaliens. L'incisure pariétale (comme le kryptaphion) est plus haute chez les *Homo sapiens* préhistoriques alors que l'astérion est postérieur à celui des Néandertaliens. Le sagittum est situé plus haut par rapport à l'axe bregma – lambda. En vue frontale le stéphanion est positionné plus haut chez les *Homo sapiens* préhistoriques.

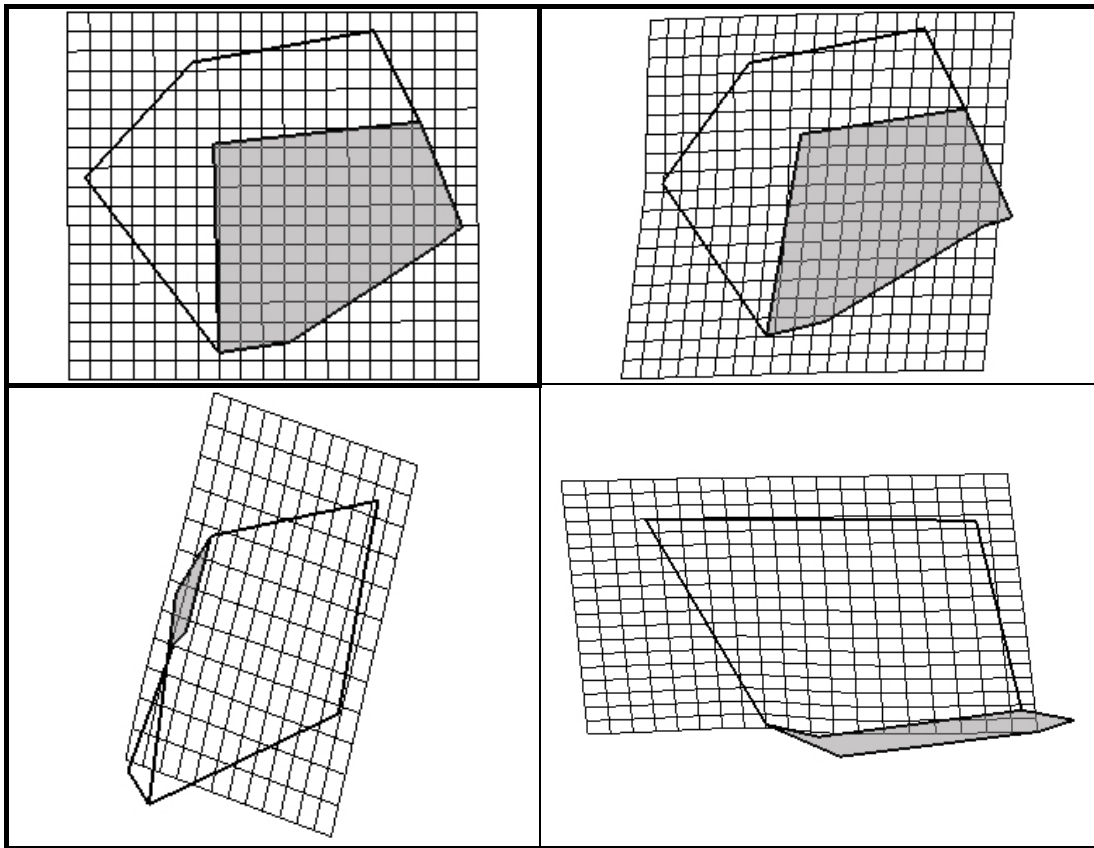


Figure 230 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits de *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

VII.2.6 Modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des espèces du genre *Homo*

Nous présentons en figure 231 le résultat de l'ACP réalisée sur les modélisations tridimensionnelles de l'os frontal pour le genre *Homo*. Les spécimens sont nommés en figures 232 et 233.

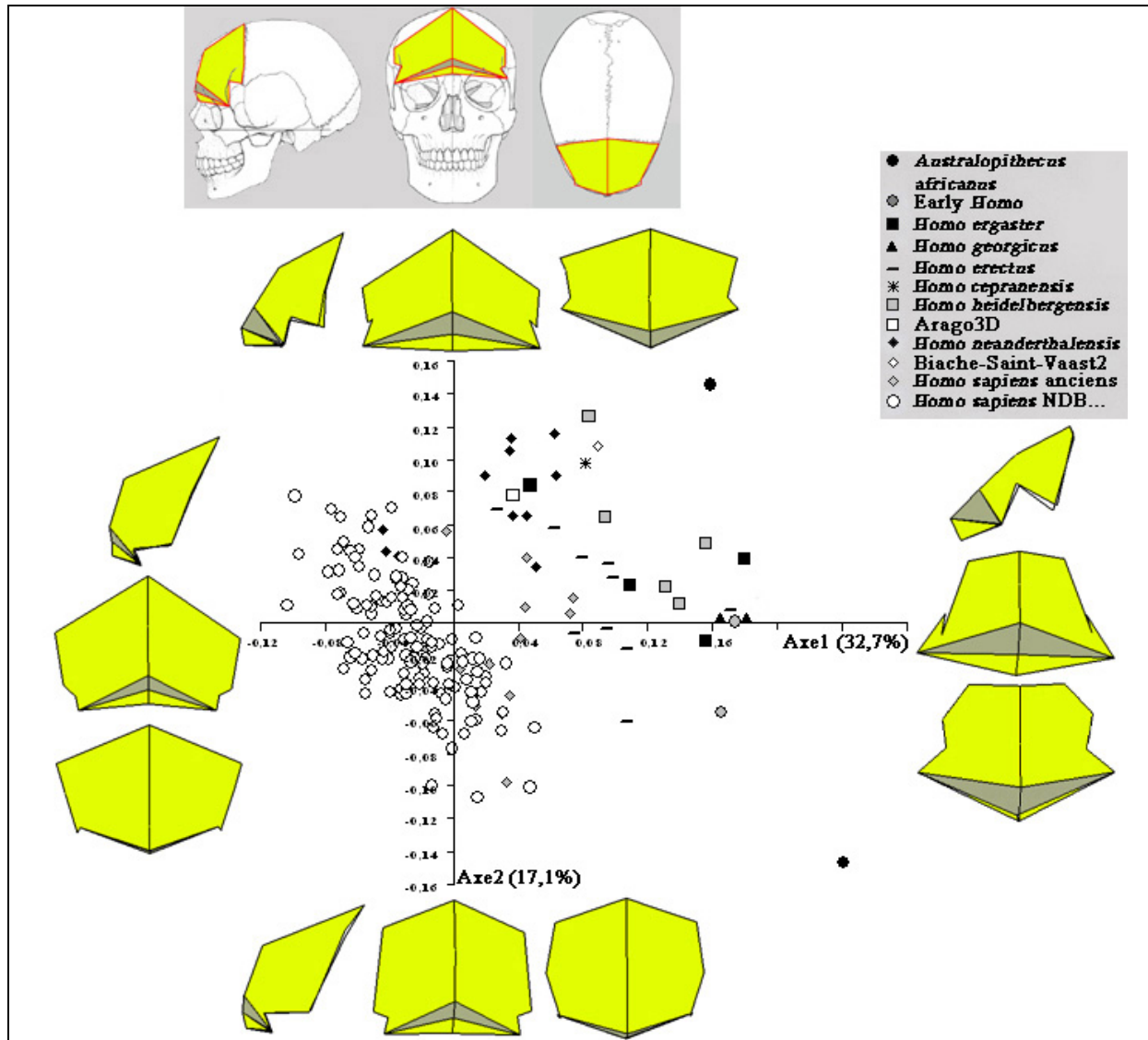
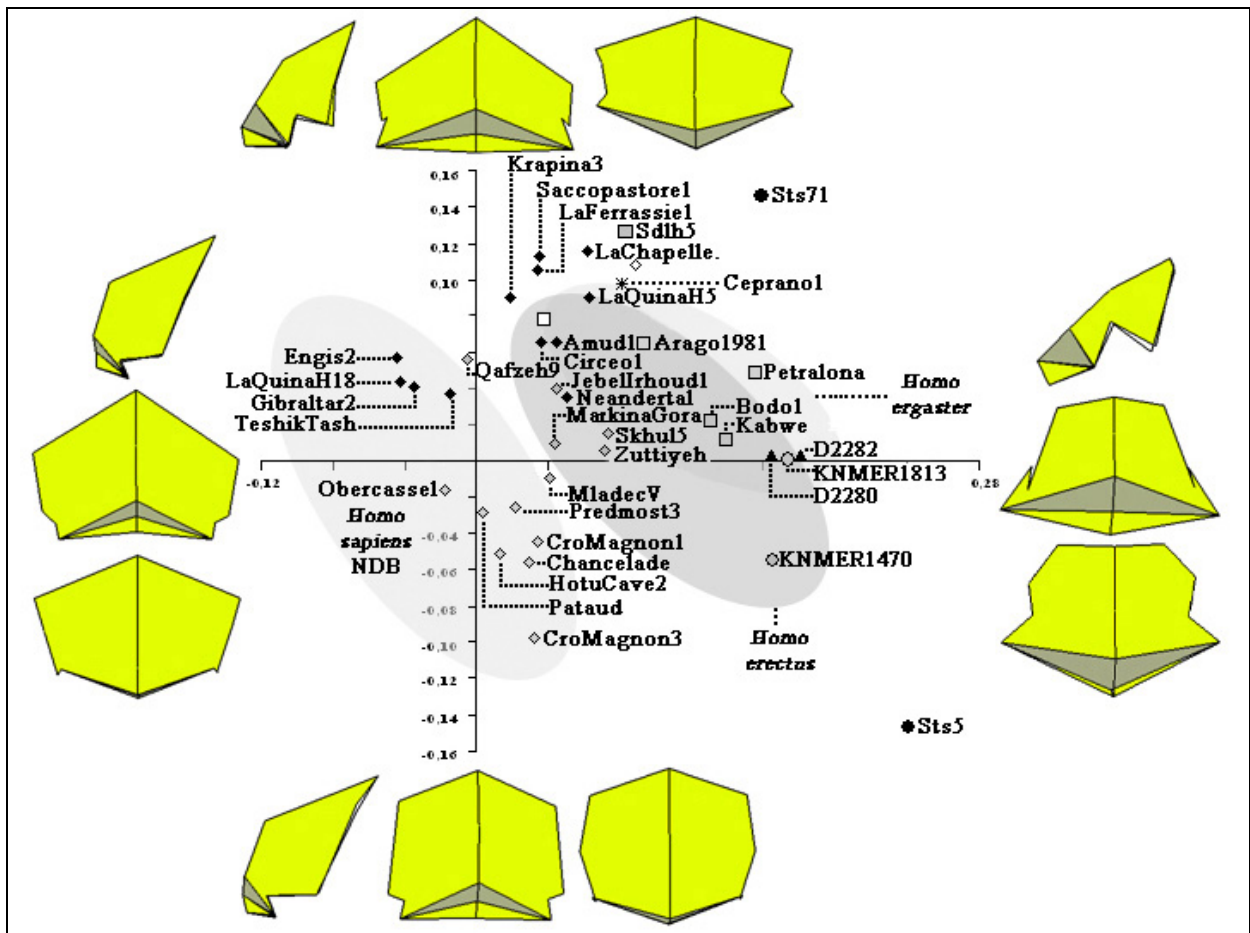


Figure 231 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal du genre *Homo*.

L'axe 1 explique 32,7% de la variance totale des individus étudiés contre 17,1% pour l'axe 2. Ces deux axes représentent près de la moitié de la variance totale (graphique 13).

Passer de la valeur maximale de l'axe 1 (Sts 5) à sa valeur minimale (*Homo sapiens* historiques) correspond à la transition d'une écaïlle frontale peu large à large (stéphanions de plus en plus externes) et à la réduction de la largeur des arcades orbitaires (largeur entre les

points fronto-malaires temporaux). Cette inversion des largeurs dominantes s'accompagne, en allant vers les valeurs négatives, de la réduction de la constriction post-orbitaire. Le nasion et la glabellle sont situés de plus en plus en retrait par rapport au segment entre les points fronto-malaires temporaux, segment qui devient plus antérieur. Ce passage vers les valeurs négatives de l'axe 1 correspond aussi à l'épaississement de l'écaille frontale en vue latérale.



Le passage de la valeur maximale de l'axe 2 (Sts 71) à sa valeur minimale (Sts 5) entraîne l'allongement (projection horizontale) de l'os frontal avec un bregma plus postérieur par rapport à l'écaille. Le métopion est situé de plus en plus antérieurement contribuant à allonger la portion supérieure de l'écaille frontale et à épaissir l'écaille en vue latérale en allant vers les valeurs négatives de l'axe 2. En parallèle les stéphanions sont situés de plus en plus haut.

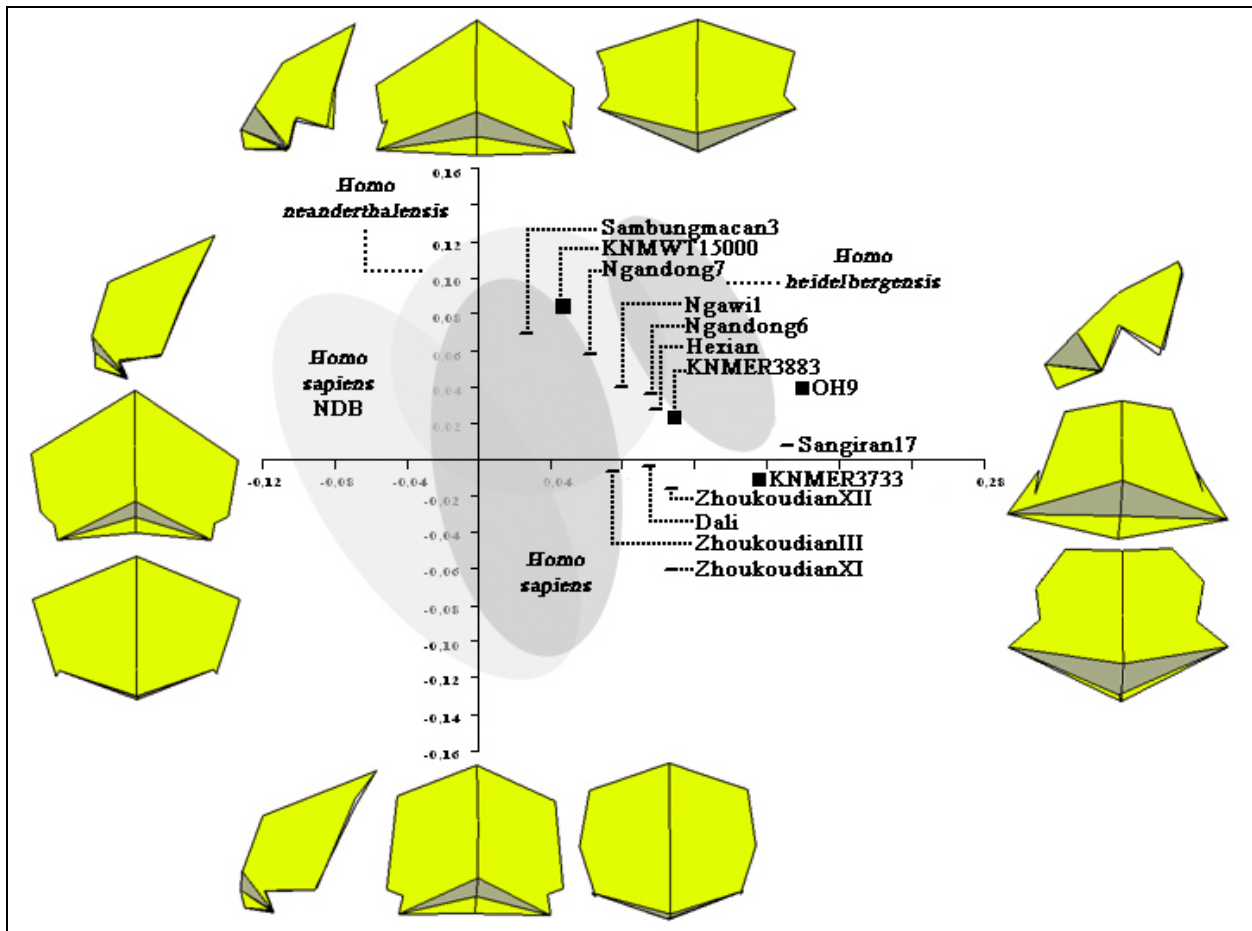


Figure 233 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal du genre *Homo* ; Noms des individus fossiles - bis.

Aux extrémités positive de l'axe 1 et négative de l'axe 2, l'os frontal de Sts 5 présente une écaille étirée avec une faible largeur bistéphanique. Sts71 a une configuration différente suivant l'axe 1 et l'axe 2 avec des stéphanions bien plus bas.

Après les *Australopithecus africanus* nous trouvons avec une valeur inférieure sur l'axe 1, la forme consensus des premiers *Homo*. Ceux-ci ne diffèrent entre eux que par l'axe 2 avec une valeur plus négative pour KNM-ER 1470 (-0,06 contre 0), c'est-à-dire avec des stéphanions situés plus haut.

La forme consensus suivante (+0,17 ; +0) correspond aux deux *Homo georgicus* étudiés. La largeur des arcades orbitaires est supérieure à la valeur de la largeur minimale de l'écaille donnant ainsi une forte constriction post-orbitaire. La position sur l'axe 1 est liée à la position élevée et proche de l'axe sagittal des stéphanions correspondants à des lignes temporelles hautes.

Les *Homo ergaster* ont une valeur consensus inférieure sur l'axe 1 (environ +0,15 contre +0,165 pour les premiers *Homo*). OH9, *Homo erectus* africain, a une valeur supérieure

à celle des premiers *Homo*. L'écart entre les individus de cette population est de 0,07 suivant l'axe 1 et de 0,05 suivant l'axe 2. La population est assez homogène si l'on ne tient pas compte de l'adolescent KNM-WT 15000. Celui-ci a des stéphanions plus externes (largeur de l'écaille supérieure) et plus bas, un os frontal modélisé moins allongé avec un recul du nasion et de la glabelle, une écaille plus épaisse (métopion plus antérieur) et une constriction post-orbitaire moindre. Ces différences pouvant être liée à l'âge (non apparition des caractères adultes, notamment au niveau des arcades orbitaires), nous le conservons à titre indicatif.

Avec une forme consensus similaire nous trouvons Petralona, Bodo 1 et Kabwe. Ces trois *Homo heidelbergensis* sont proches sur les axes 1 (0,02 de différence) et 2 (0,04). Par contre ces trois fossiles diffèrent des deux autres spécimens, Arago3D et Sima de los Huesos 5 (différence entre les formes consensus de 0,08 sur l'axe 1 et de 0,06 sur l'axe 2). Nous considérons donc les *Homo heidelbergensis* en deux groupes différents.

Notre restauration de l'os frontal d'Arago3D a une écaille élargie postérieurement avec un écart supérieur entre les stéphanions (valeur inférieure sur l'axe 1 à celle d'Arago1981) et moins longue en projection horizontale (valeur supérieure sur l'axe 2).

Notre proposition de reconstruction de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2 est comprise entre les représentants de trois espèces : Ceprano 1, Sima de los Huesos 5, La Chapelle-aux-Saints.

Les *Homo erectus* étudiés sont dispersés le long de l'axe 1 (+0,17 à +0,02) et de l'axe 2 (+0,07 à -0,06) avec un écart faible entre les spécimens proches, à l'exception de Sangiran 17 qui se trouve écarté sur l'axe 1 de 0,06 du plus proche fossile de cette population.

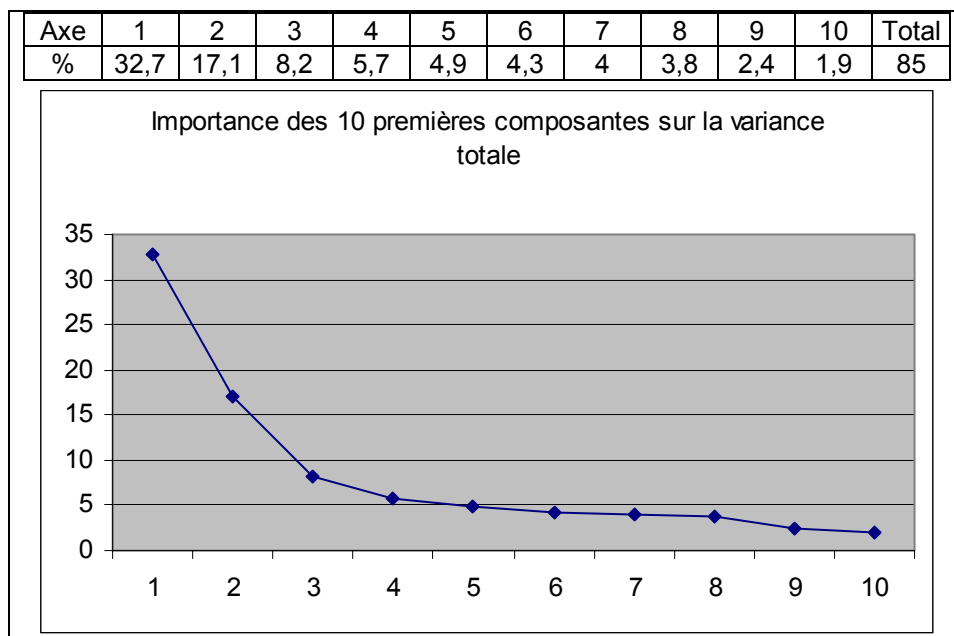
Suivant l'axe 2 Zhoukoudian XI est écarté de 0,04 du plus proche individu. Les fossiles découverts en Chine et ceux découverts en Indonésie sont mélangés sans distinction régionale possible. Nous considérons donc les *Homo erectus* comme une seule population.

Avec une faible variation le long de l'axe 1 (0,04), l'espèce *Homo neanderthalensis* se différencie surtout suivant l'axe 2 avec des valeurs allant de +0,04 pour Neandertal à +0,12 pour La Chapelle-aux-Saints qui a une écaille supérieure plus courte et plus large que celle de Neandertal. Les adultes sont relativement proches et peuvent être considérés comme une seule population. Par contre, les formes juvéniles des néandertaliens (Teshik-Tash, Gibraltar 2, La Quina H18 et Engis 2) ont une valeur négative sur l'axe 1 avec une constriction post-orbitaire presque inexistante et une écaille frontale très divergente postérieurement. Nous conservons ces individus à titre à indicatif.

Ceprano 1 a une valeur légèrement supérieure sur l'axe 1 à celle des Néandertaliens adultes et présente un os frontal proche de celui de La Quina H5 et de La Chapelle-aux-Saints.

Comme les *Homo neanderthalensis*, les *Homo sapiens* préhistoriques se différencient surtout le long de l'axe 2 (-0,1 à +0,06) contre une variation plus faible le long de l'axe 1 (-0,005 à +0,07). Par contre la tendance morphologique est inverse de celle des Néandertaliens du fait de l'axe 2 avec une écaille frontale plus avancée en vue latérale, un métopion très antérieur et un bregma plus postérieur, et des stéphanions situés plus haut. L'écaille est plus longue en projection horizontale et plus épaisse.

Alors que Qafzeh 9 est situé à proximité des *Homo sapiens* historiques avec une valeur positive sur l'axe 2, Jebel Irhoud 1 est proche de l'Homme de Neandertal avec une valeur légèrement inférieure sur l'axe 1 par rapport à celui-ci. Skhul 5 et Zuttiyeh ont les plus fortes valeurs sur l'axe 1 pour les *Homo sapiens*, avec la conformation tridimensionnelle d'aspect la plus « archaïque » (constriction post-orbitaire marquée, écart entre les stéphanions moindre). Pataud, Hotu Cave 2, Predmost 3, Chancelade et Cro-Magnon 1 et 3 ont des conformations correspondant à celles d'*Homo sapiens* historiques. Ceux-ci sont dispersés suivant une oblique allant des coordonnées suivantes (-0,11 ; +0,08) à (+0,05 ; -0,10), avec d'un côté un os frontal avec des stéphanions externes et bas, des arcades presque sous l'écaille et de l'autre un os frontal épaissi latéralement, une écaille longue et haute en vue de face, et des stéphanions presque aussi hauts que le bregma.



Graphique 13: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal dans le genre *Homo*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des premiers *Homo* et des *Homo georgicus*

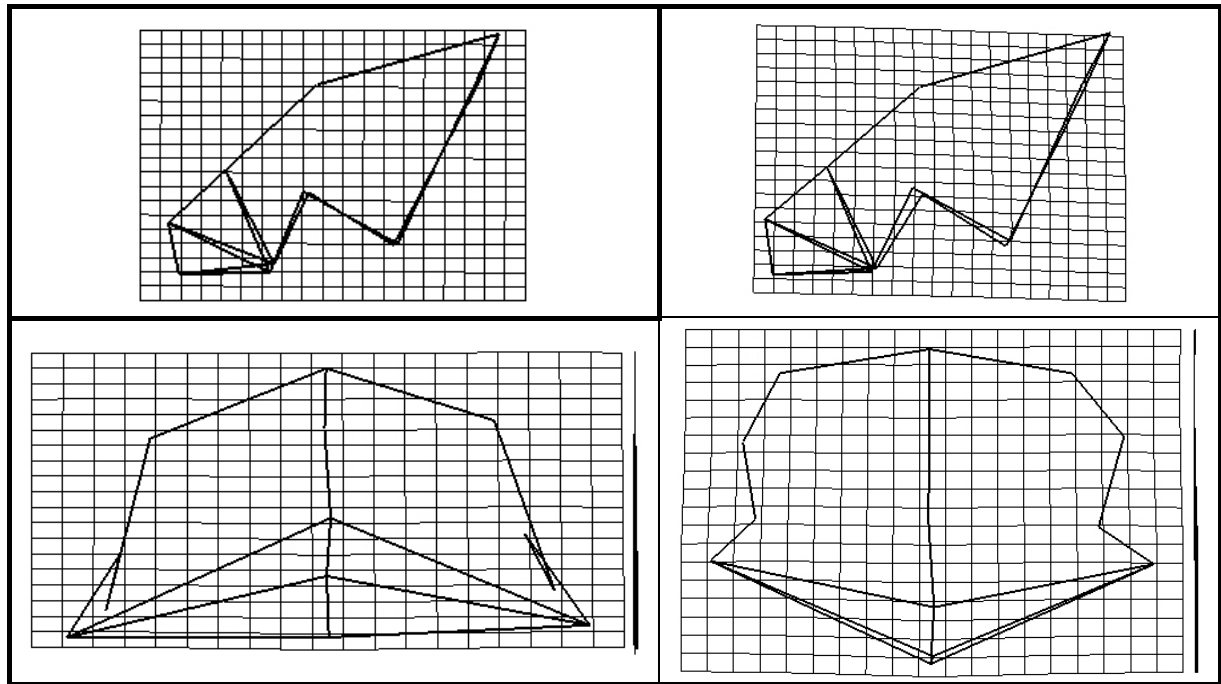


Figure 234 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des premiers *Homo* et des *Homo georgicus* en TPS.

Les deux groupes ont un os frontal aplati et fuyant, peu large au niveau des stéphanions (figure 234). La largeur minimale (points fronto-temporaux) est supérieure à la largeur bistéphanique. La constriction post-orbitaire est importante en vue supérieure.

Les différences entre ces deux groupes fossiles sont peu marquées. D2282 et 2280 ont une glabellule plus haute que celle de la forme consensus des premiers *Homo*. Le nasion des premiers *Homo* est plus postérieur par rapport à la glabellule (projection horizontale). En vues supérieure et frontale, nous constatons un positionnement légèrement plus interne des stéphanions chez les *Homo georgicus* que chez les premiers *Homo*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des premiers *Homo* et des *Homo ergaster*

Les formes consensus des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* sont semblables. La principale différence entre les deux formes (figure 235) réside dans le positionnement plus externe et plus antérieur des stéphanions. De plus, chez les *Homo ergaster* le nasion se situe au même niveau que les points fronto-malaires temporaux dans les plans sélectionnés.

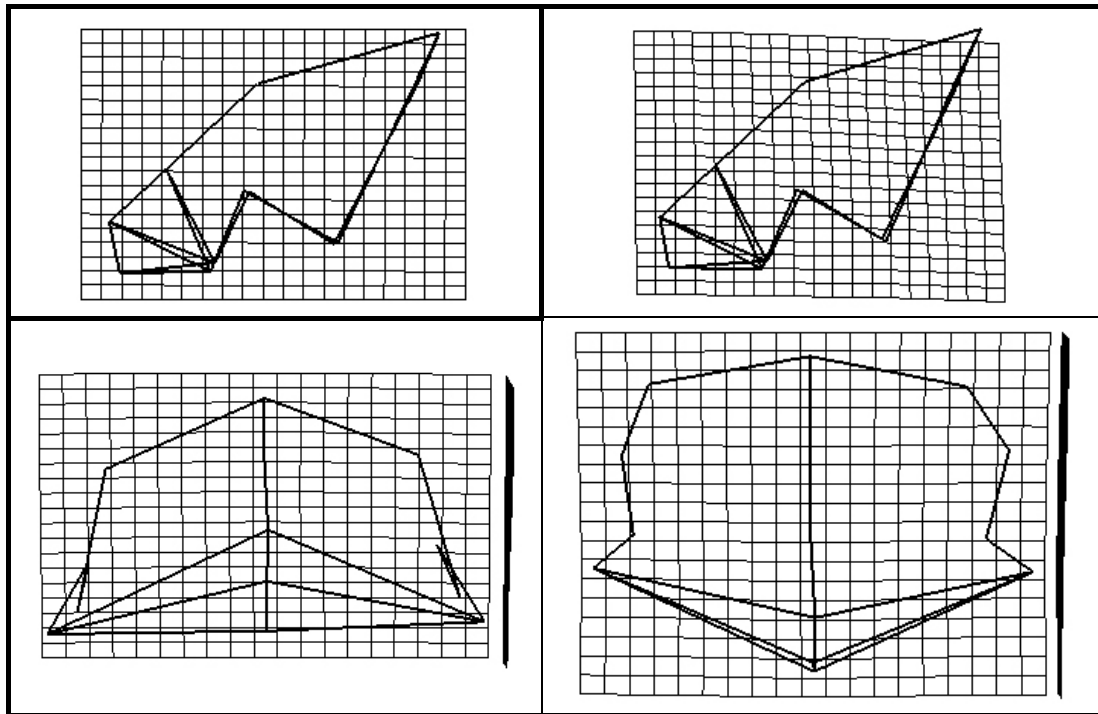


Figure 235 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des premiers *Homo* et des *Homo ergaster* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo georgicus* et des *Homo ergaster*

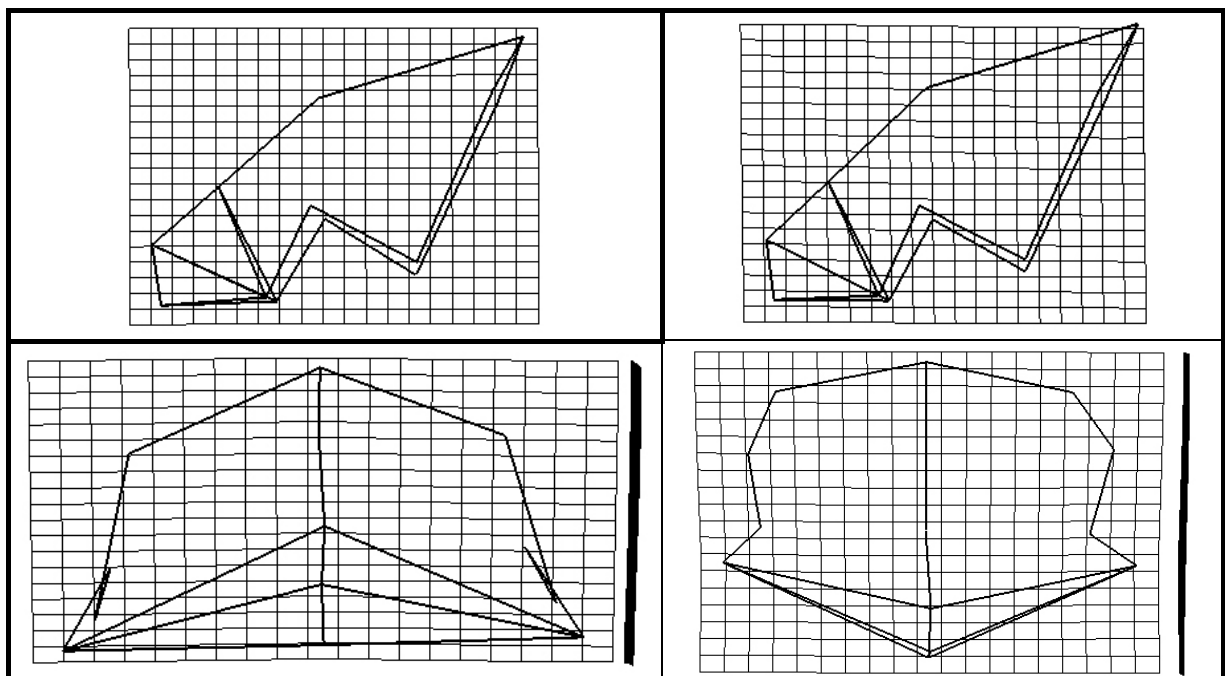


Figure 236 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de *Homo georgicus* et des *Homo ergaster* en TPS.

Les *Homo ergaster* ont une forme consensus légèrement différente de celle des *Homo georgicus* avec des stéphanions plus bas et plus externes en vue frontale et supérieure (figure 236). La constriction post-orbitaire est aussi inférieure chez ces individus à celle que l'on peut relever sur D2280 et D2282.

La forme consensus des *Homo georgicus* ayant une valeur sur l'axe 1 supérieure à celle de la forme consensus des *Homo ergaster*, nous ne ferons pas de comparaison entre la forme consensus des *Homo georgicus* et celles des *Homo cepranensis*, *Homo heidelbergensis* et *Homo erectus*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo ergaster* et d'*Homo cepranensis*

Ceprano 1 a un stephanion plus antérieur, plus externe et plus bas par rapport à celui des *Homo ergaster* (figure 237). L'os frontal de Ceprano 1 a une constriction post-orbitaire réduite en vue supérieure (accroissement de la largeur entre les points fronto-temporaux par rapport à la largeur entre les points fronto-malaires temporaux). Il y a réduction générale de la profondeur de l'os en vue latérale avec une réduction de la corde bregma – glabellle.

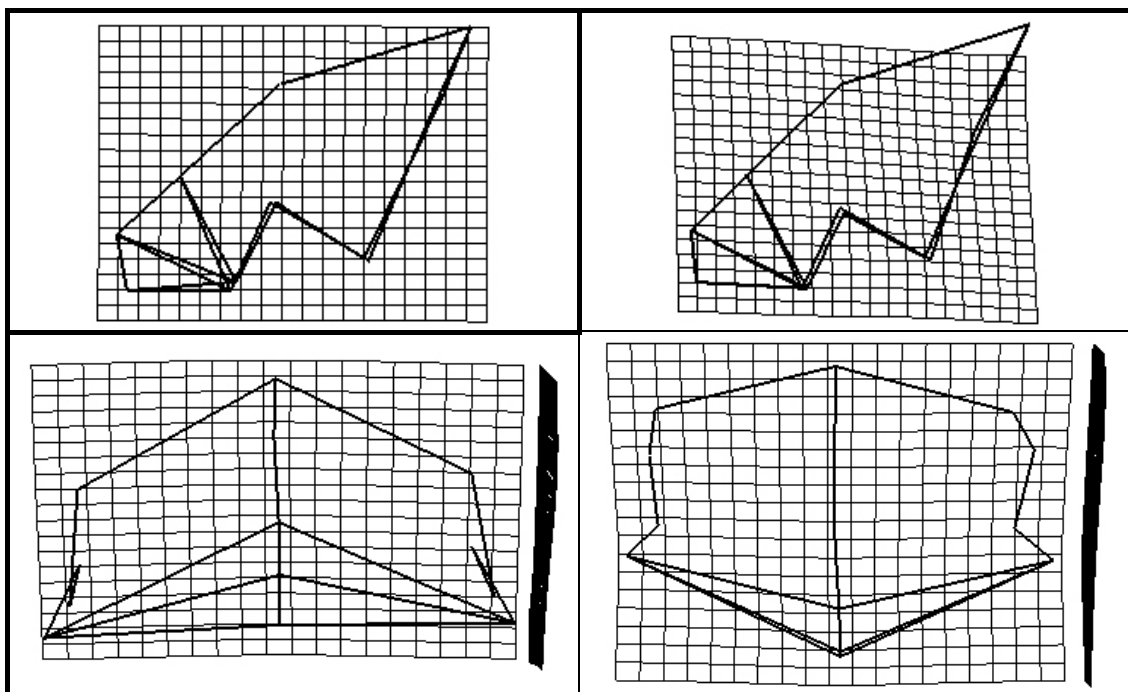


Figure 237 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de *Homo ergaster* et d'*Homo cepranensis* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo ergaster* et d'Arago3D-Sdlh5

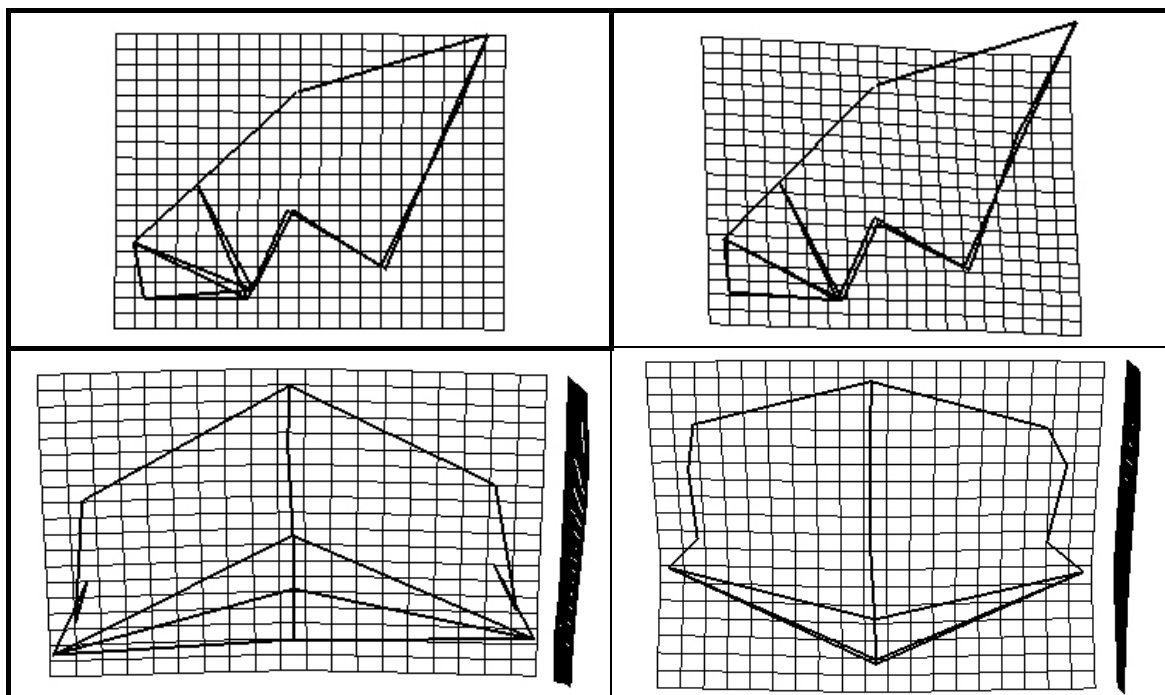


Figure 238 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des *Homo ergaster* et d'Arago3D-Sdlh5 en TPS.

Les différences entre les formes consensus des *Homo ergaster* et du groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 (figure 238) sont semblables à celles constatées entre *Homo ergaster* et *Homo cepranensis*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo ergaster* et de Petralona-Bodo1-Kabwe

Nous ne constatons pas de différences entre la modélisation tridimensionnelle consensus des *Homo ergaster* et celle du groupe Petralona-Bodo1- Kabwe (figure 239). Les modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de ces deux groupes sont relativement similaires.

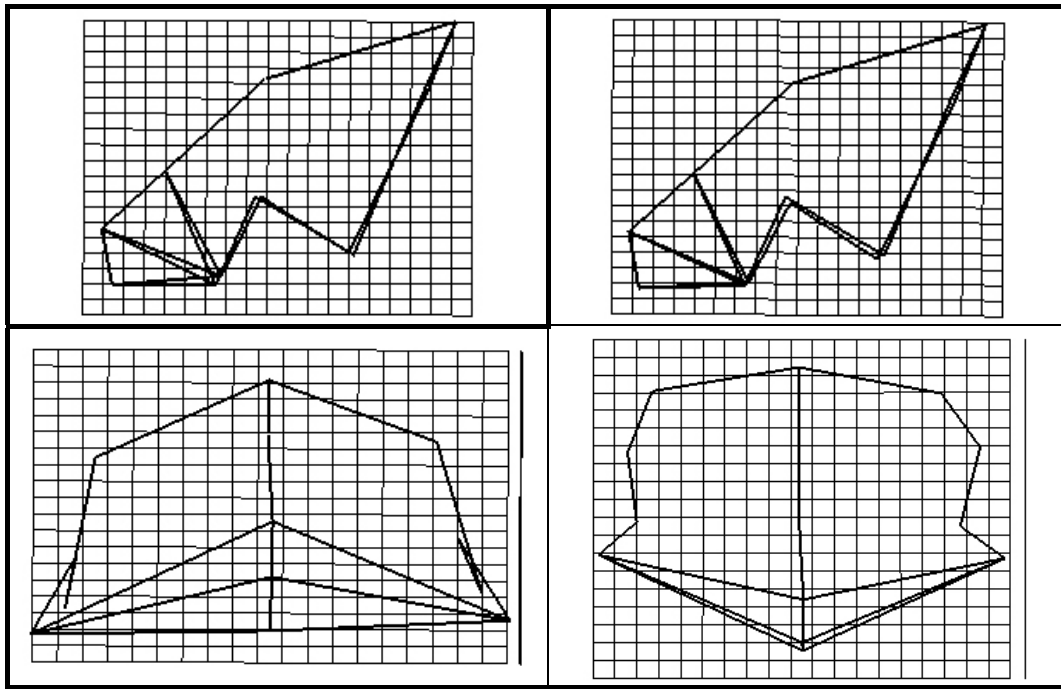


Figure 239 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des *Homo ergaster* et de Petralona-Bodo1-Kabwe en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo ergaster* et des *Homo erectus*

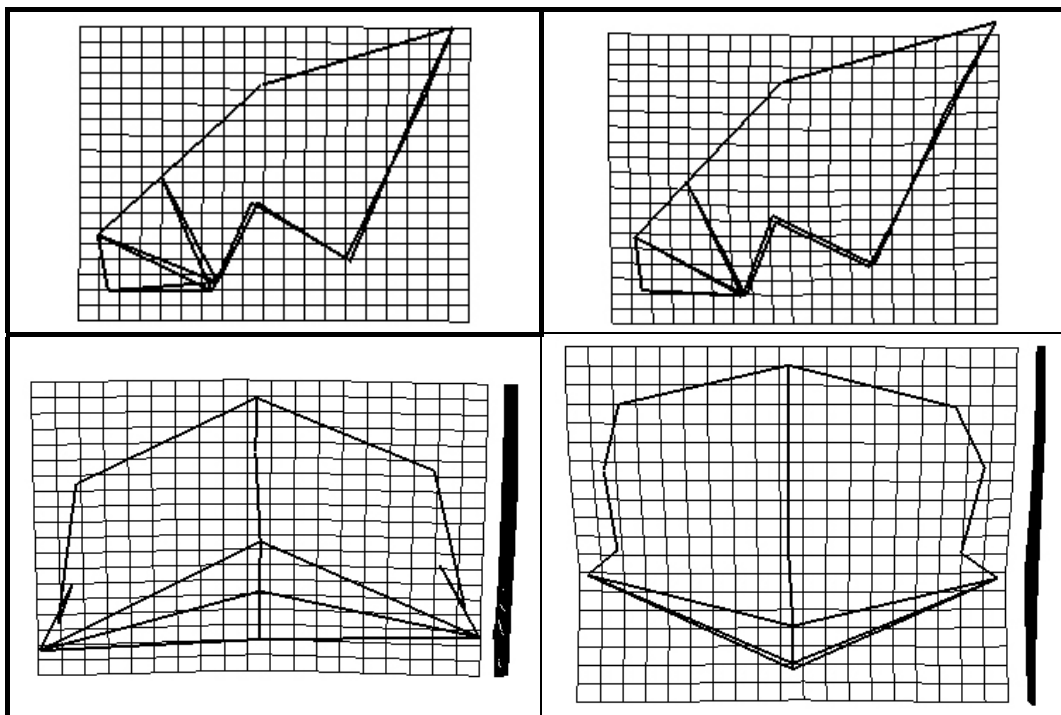


Figure 240 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des *Homo ergaster* et des *Homo erectus* en TPS.

La forme consensus de l'os frontal des *Homo erectus* diffère de celle des *Homo ergaster* avec un stéphanion plus latéral par rapport au plan sagittal (figure 240). La constriction post-orbitaire est réduite avec un point fronto-temporal plus externe, plus proche du point fronto-malaire temporal. Il y a réduction de la distance glabella – point supraglabellaire.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo ergaster* et des *Homo sapiens* préhistoriques

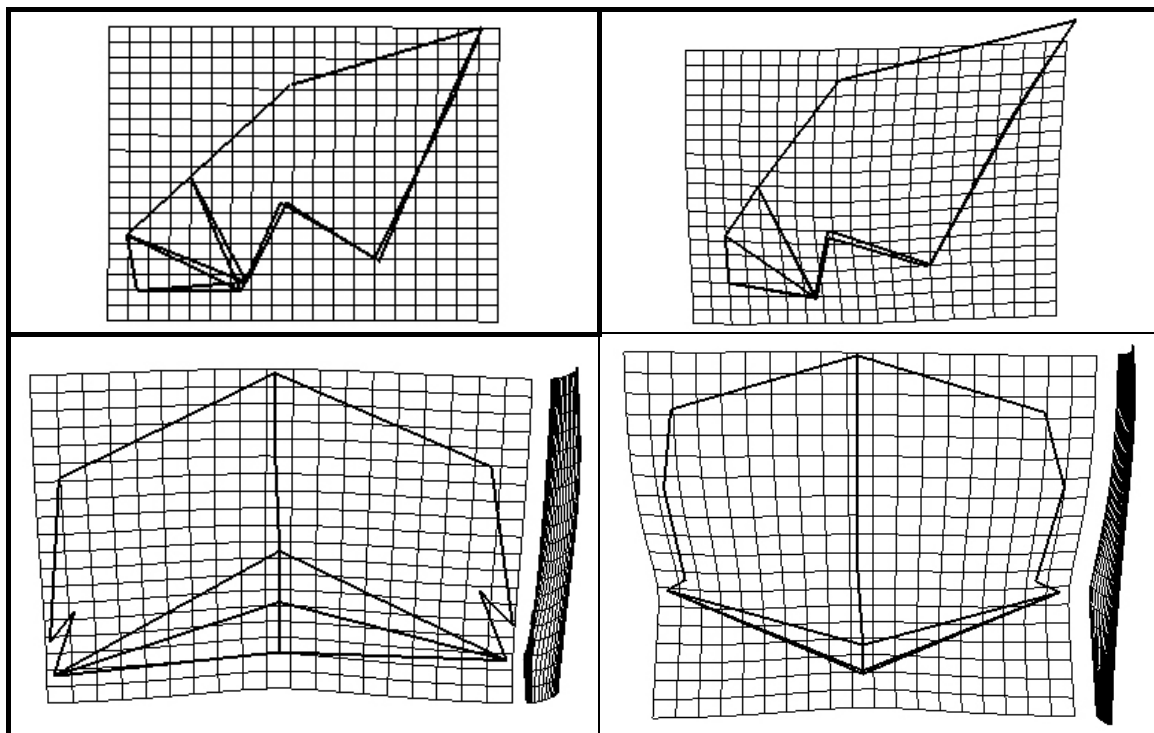


Figure 241 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des *Homo ergaster* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

La conformation spatiale de l'os frontal des *Homo sapiens* préhistoriques est différente de celle des *Homo ergaster* (figure 241). Le point supraglabellaire est situé plus antérieurement dans le plan latéral comme le point fronto-temporal plus antérieur. En vue supérieure ce point est plus latéral, ce qui contribue à donner une faible constriction post-orbitaire. Les sphénions et stéphanions se situent plus latéralement et forment en vue frontale un segment presque vertical. L'angulation point supraglabellaire – métopion – bregma est plus marquée, contribuant à donner un front plus bombé.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques

Les deux populations d'*Homo sapiens* présentent des modélisations semblables (figure 242). Certaines particularités sont accentuées.

Les points nasion, glabellle, supraglabellaire sont presque alignés en vue latérale. Le métopion est plus antérieur, ce qui accentue la courbure de la modélisation de l'os frontal avec une portion faciale de l'écaille à tendance verticale et une portion supérieure de l'écaille cérébrale à tendance horizontale. L'angle entre les deux portions pour les *Homo sapiens* préhistoriques est le plus fermé de tous les Hominidés étudiés. La portion supérieure de l'écaille est plus allongée que celle des spécimens préhistoriques. Les *Homo sapiens* historiques ont une écaille cérébrale frontale très développée, anguleuse sagittalement.

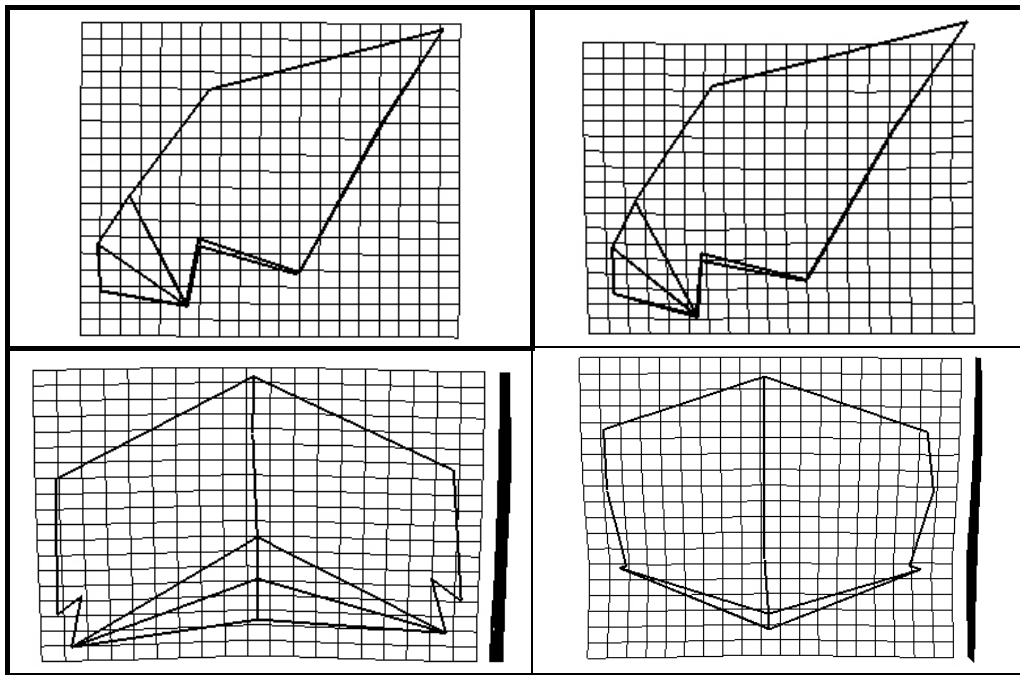


Figure 242 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des *Homo sapiens* préhistoriques et des *Homo sapiens* historiques en TPS.

La largeur minimale (points fronto-temporaux) augmente et, avec une valeur proche de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux, elle contribue à donner une constriction post-orbitaire minime. Ces points fronto-temporaux et fronto-malaires temporaux sont plus antérieurs en vue latérale. Les points fronto-malaires temporaux sont inférieurs et se situent sous le nasion en vues frontale et latérale. Du fait de l'écartement des stéphanions et de la réduction de la constriction post-orbitaire, l'écaille n'est quasi plus convergente postérieurement. En vue supérieure l'espace dévolue aux arcades décroît.

Le passage des individus préhistoriques à ceux historiques ne correspondant qu'à une accentuation des caractères de la population plus ancienne, nous conservons celle-ci comme référence pour la comparaison des individus fossiles avec les *Homo sapiens*.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal d'*Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis*

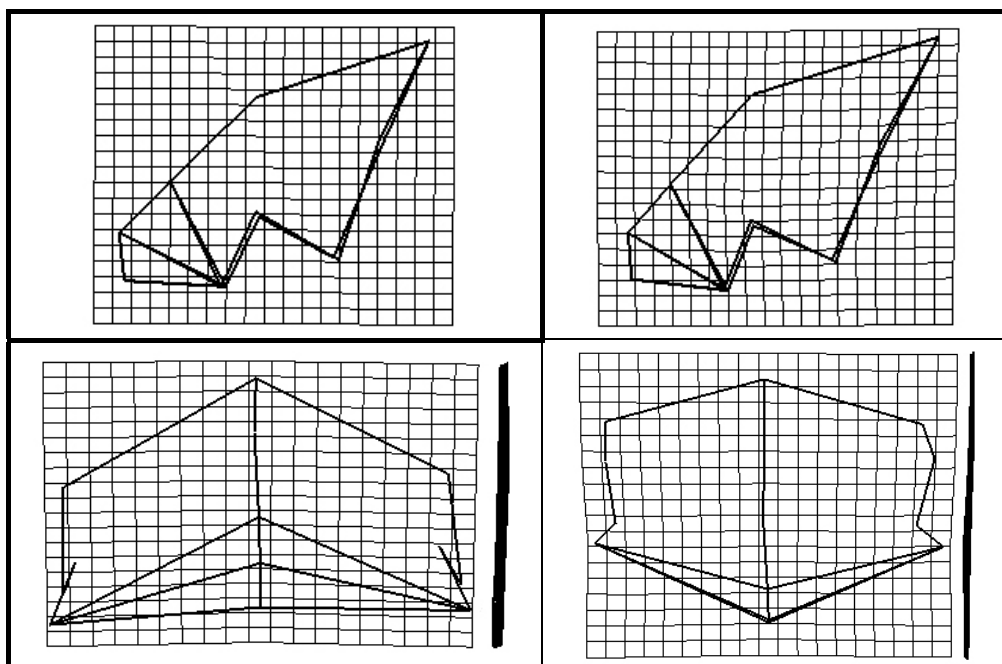


Figure 243 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'*Homo cepranensis* et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

Les modélisations tridimensionnelles des deux espèces sont semblables avec de légères différences (figure 243). Chez les Néandertaliens la largeur minimale est plus antérieure tout comme le métopion. Les stéphanions sont plus externes.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Arago3D-Sdlh5 et de Petralona-Bodo1-Kabwe

Les conformations spatiales consensus des deux groupes d'*Homo heidelbergensis* diffèrent (figure 244). La modélisation du groupe Petralona – Bodo 1 – Kabwe est plus petite en hauteur pour une profondeur moindre. Les stéphanions sont plus internes et plus hauts par rapport à ceux de Arago3D – Sima de los Huesos 5, et légèrement plus en arrière par rapport au segment sphénion – bregma en vue latérale. Nous constatons plus de différences entre ces deux groupes d'une même espèce qu'entre *Homo cepranensis* et *Homo neanderthalensis*.

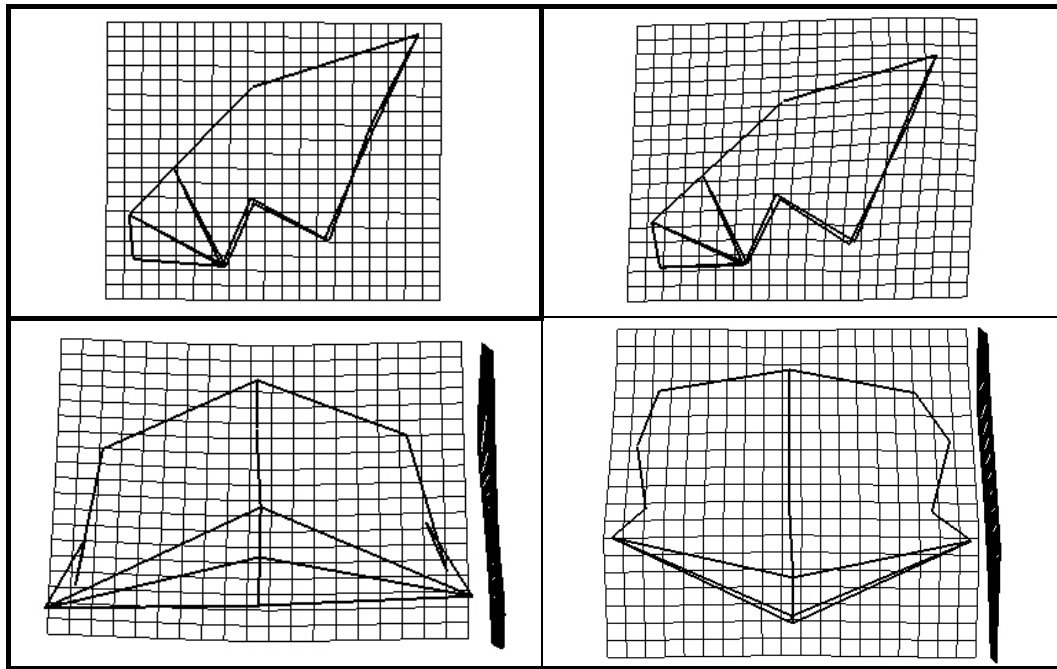


Figure 244 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et de Petralona-Bodo1-Kabwe en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Arago3D-Sdlh5 et des *Homo erectus*

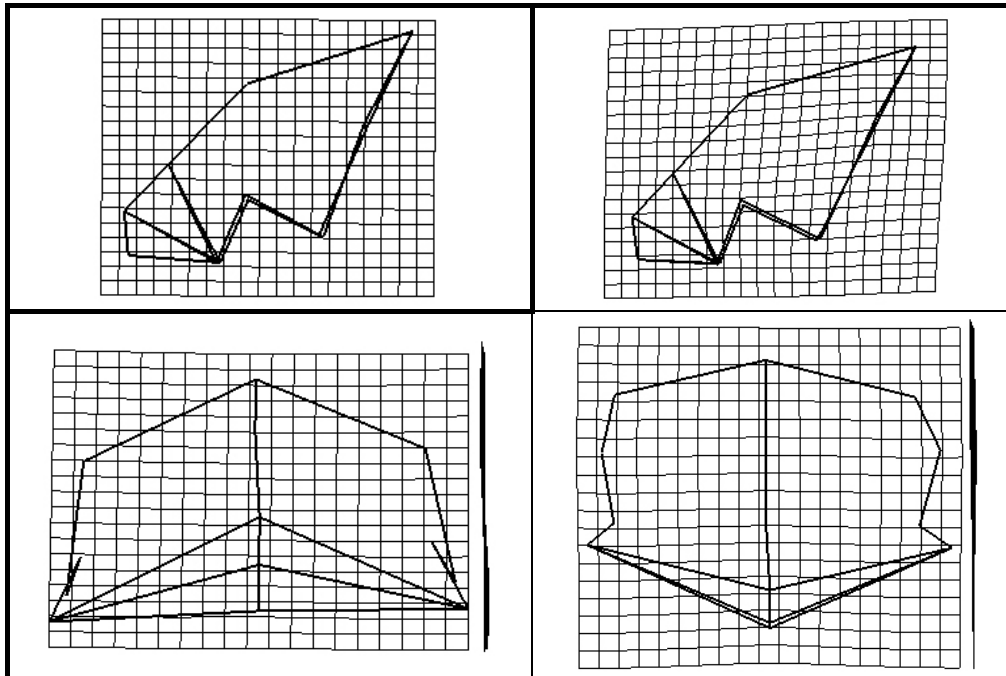


Figure 245 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et des *Homo erectus* en TPS.

La modélisation des *Homo erectus* est légèrement plus large au niveau des arcades frontales (FMT – nasion – FMT) en vue frontale (figure 245). L'os est plus convergent postérieurement avec des stéphanions plus internes par rapport au plan sagittal. L'angle stéphanion – bregma – stéphanion est plus fermé en vue frontale.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Arago3D-Sdlh5 et des *Homo neanderthalensis*

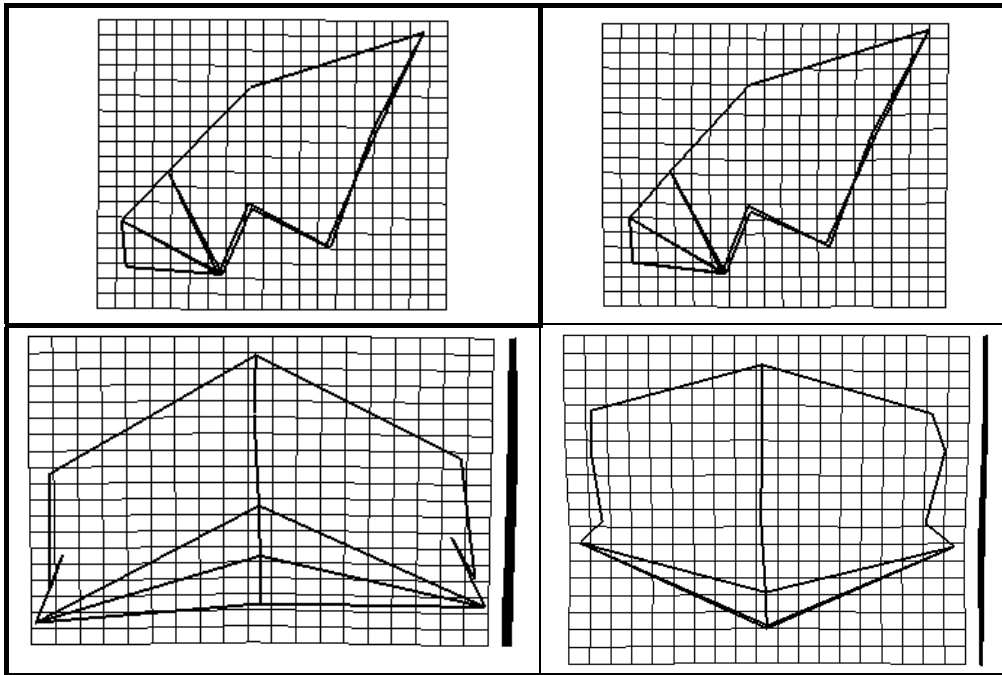


Figure 246 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

En raison de la grande similitude *Homo cepranensis* – *Homo neanderthalensis* sur l'Analyse en Composantes Principales réalisée, nous ne présentons pas de comparaison Arago3D – Sima de los Huesos 5 avec Ceprano 1, les résultats étant semblables.

Les différences constatables en vue supérieure et frontale sont faibles (figure 246). Les grilles sont peu modifiées. Le métopion est plus antérieur avancé tout comme le point supraglabellaire avec un bregma plus haut. Latéralement les stéphanions sont légèrement plus externes et antérieurs.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Arago3D-Sdlh5 et des *Homo sapiens* préhistoriques

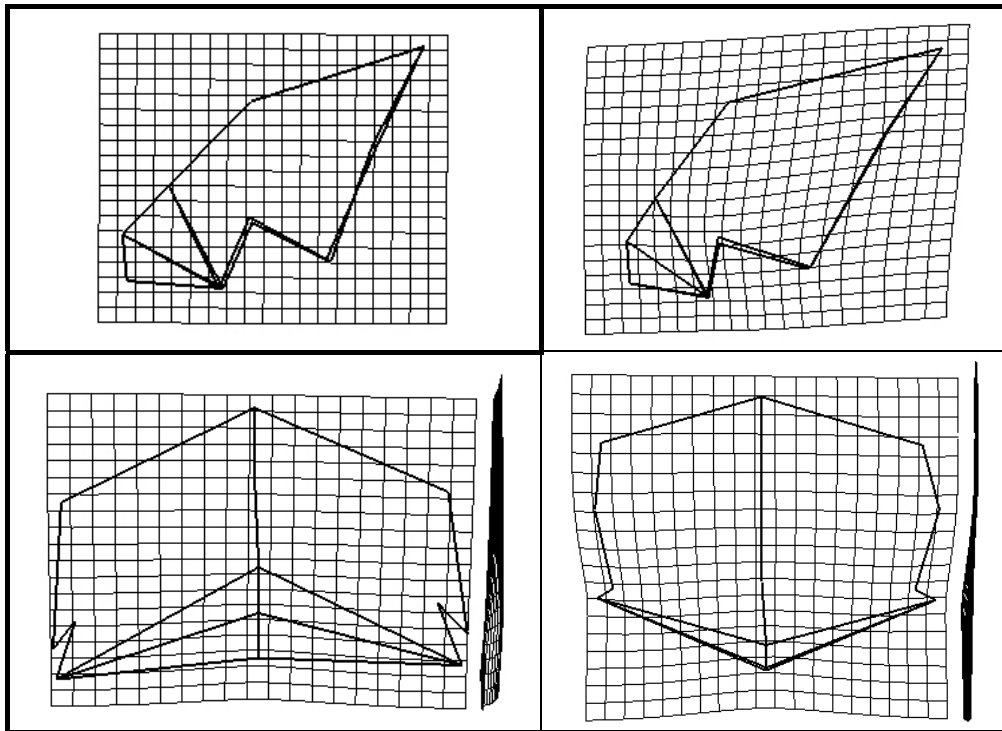


Figure 247 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Le passage de la forme consensus du groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 à celle des *Homo sapiens* préhistoriques (figure 247) nécessite une avancée du métopion en vue latérale et le recul de la glabellle et du point supraglabellaire. Ce positionnement qui accompagne la diminution de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux contribue à diminuer la constriction post-orbitaire et à rendre l'écaille moins convergente en vue supérieure du fait de sphénions plus externes. Ce mouvement du métopion est accentué par un retrait du bregma, plus postérieur. Les stéphanions des *Homo sapiens* préhistoriques sont plus externes et plus hauts, rendant l'écaille plus haute en vue de face.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Petralona-Bodo1-Kabwe et des *Homo erectus*

Les *Homo erectus* ont un métopion plus antérieur en vue latérale que celui des *Homo heidelbergensis* (figure 248). Les sphénions sont plus externes tout comme les points fronto-temporaux et les stéphanions. L'os frontal est plus large et plus bombé.

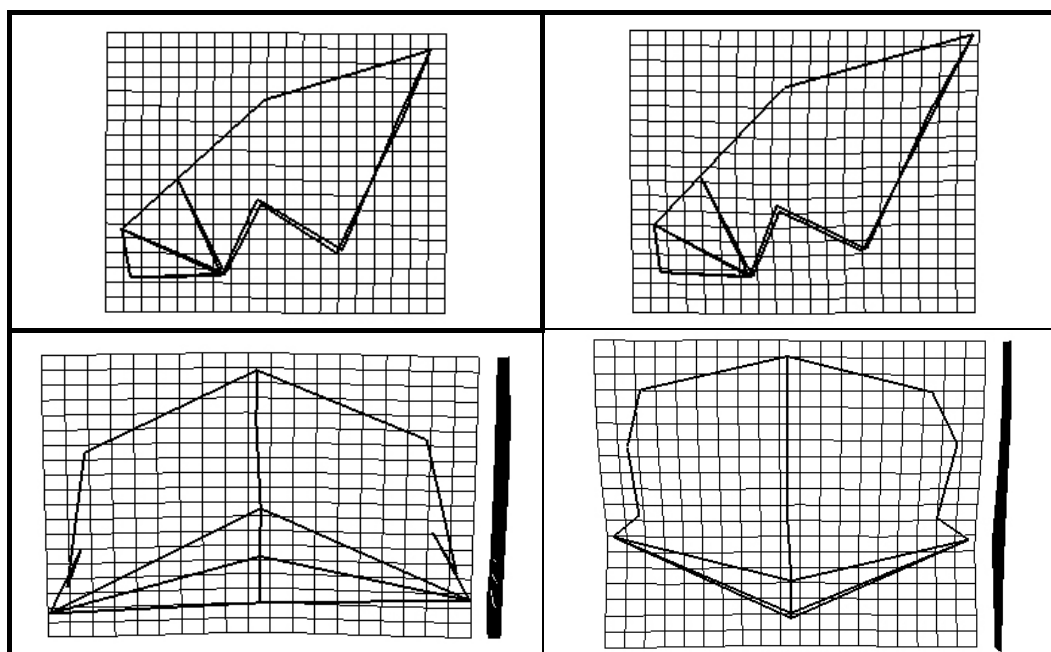


Figure 248 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de Petralona-Bodo1-Kabwe et des *Homo erectus* en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Petralona-Bodo1-Kabwe et des *Homo neanderthalensis*

En raison de la grande proximité *Homo cepranensis* – *Homo neanderthalensis* sur l'ACP réalisée, nous ne présentons pas de comparaison du groupe Petralona-Bodo1-Kabwe avec Ceprano 1, les résultats étant similaires à ceux qui suivent (figure 249).

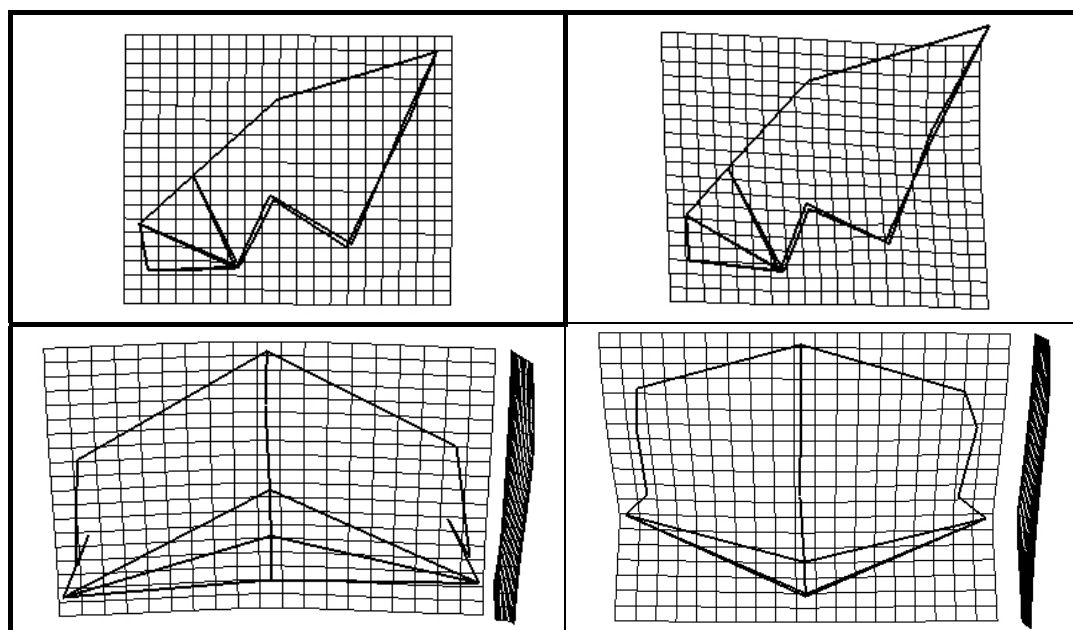


Figure 249 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de Petralona-Bodo1-Kabwe et des *Homo neanderthalensis* en TPS.

La modélisation tridimensionnelle des Néandertaliens est différente de celle de ce groupe d'*Homo heidelbergensis*. Le métopion est plus antérieur tout comme le nasion et le point supraglabellaire. En raison de cette avancée du métopion le front est moins fuyant. Les stéphanions sont plus bas en vue frontale, et plus externes par rapport à l'axe sagittal.

Les différences constatées sont semblables à celles constatées entre Arago3D – Sima de los Huesos 5 et le groupe Petralona – Bodo 1 – Kabwe.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal de Petralona-Bodo1-Kabwe et des *Homo sapiens* préhistoriques

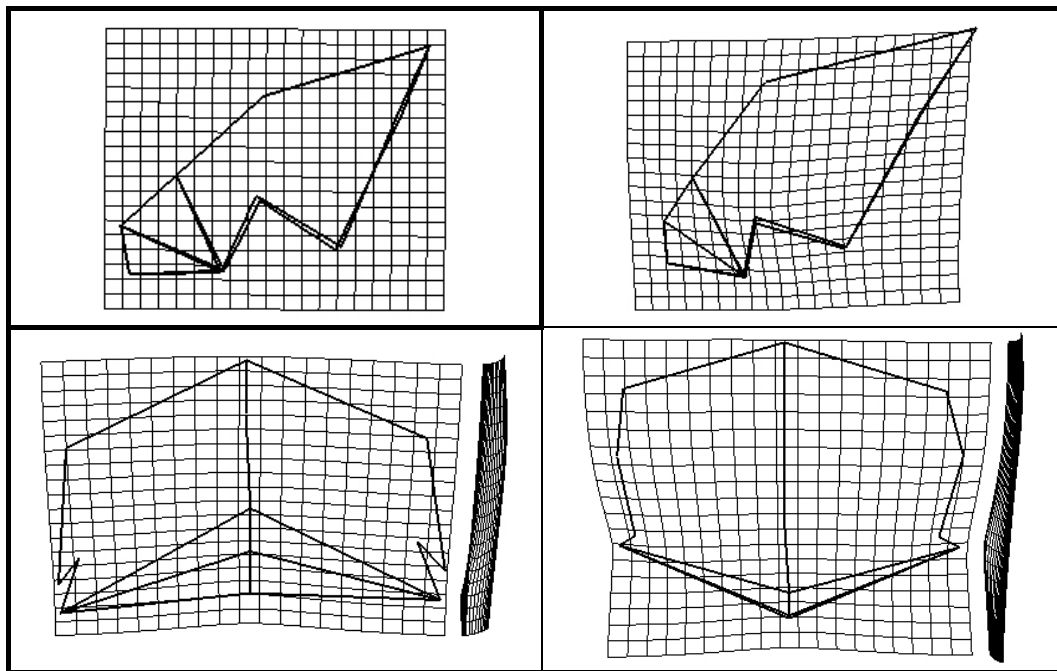


Figure 250 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de Petralona-Bodo1-Kabwe et des *Homo erectus* en TPS.

Transformer la modélisation de Petralona – Bodo 1 – Kabwe en celle des *Homo sapiens* préhistoriques (figure 250) nécessite un allongement de l'écaille supérieure entre le métopion et le bregma par un positionnement plus postérieur de celui-ci et l'avancée du métopion.

Le changement de disposition des points de repères au niveau des arcades et des points fronto-temporaux (largeur minimale) contribue à donner une conformation plus allongée et plus épaisse en vue latérale par rapport à la forme des *Homo heidelbergensis*. L'écaille est plus large au niveau des stéphanions, des sphénions et des points fronto-temporaux. Elle est moins convergente avec une faible constriction post-orbitaire.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Pour transformer la forme consensus des *Homo erectus* en celle des *Homo sapiens* préhistoriques il est nécessaire de procéder à une série de modifications de conformations tridimensionnelles (figure 251). Différents points sont situés plus antérieurement en vue latérale : le métopion, les sphénions et les stéphanions. D'autres points deviennent plus postérieurs tels que la glabelle et le nasion. Les stéphanions sont plus externes et plus hauts tout comme les sphénions. Le bregma est situé plus postérieurement en vue latérale.

L'écaille est plus large en vue de face et plus haute par rapport à celle de la forme consensus des *Homo erectus*. La constriction post-orbitaire est aussi très réduite.

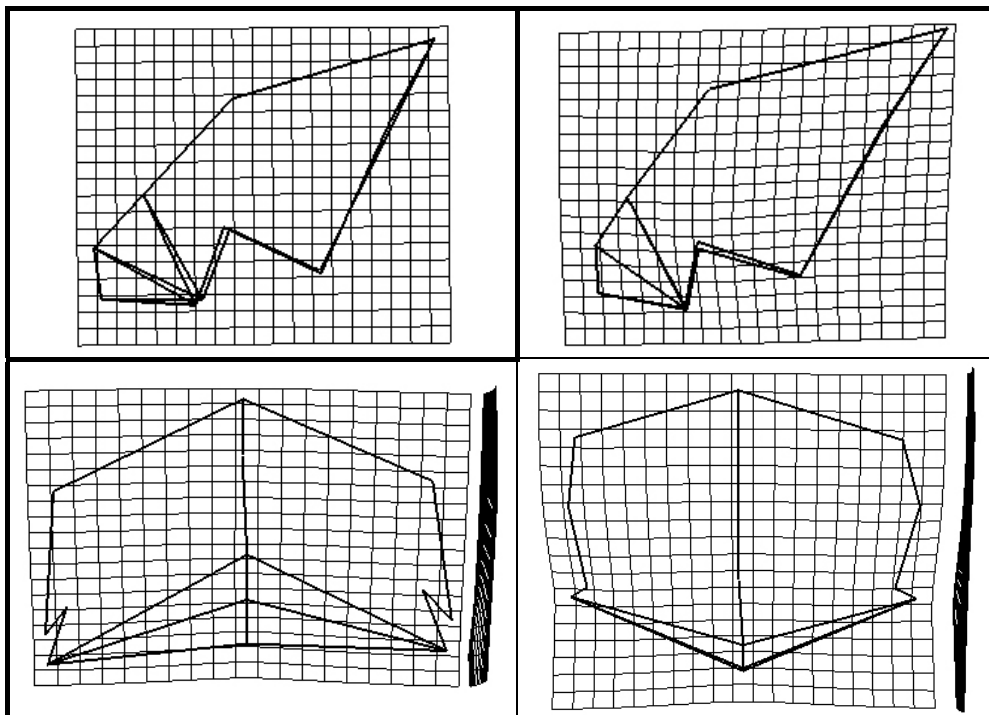


Figure 251 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

Comparaison des modélisations tridimensionnelles de l'os frontal des *Homo neanderthalensis* et des *Homo sapiens* préhistoriques

Le passage des Néandertaliens aux *Homo sapiens* préhistoriques nécessite quelques changements majeurs de conformation (figure 252).

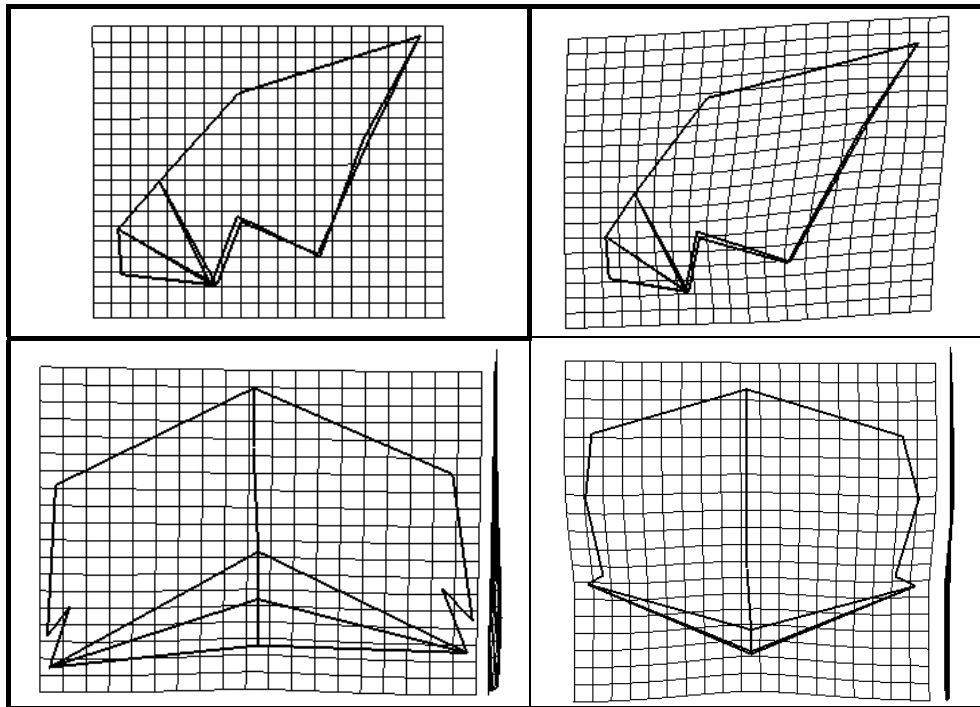


Figure 252 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux Néandertaliens et des *Homo sapiens* préhistoriques en TPS.

L'os frontal est moins profond antérieurement avec le recul du nasion et de la glabella. Les deux formes consensus ont une faible constriction post-orbitaire, mais celle-ci est encore marquée chez les Néandertaliens. La modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des *Homo sapiens* préhistoriques est plus bombée. L'écaille frontale est plus haute en vue frontale avec des stéphanions assez écartés pour les deux espèces, mais plus hauts pour les *Homo sapiens*.

La base frontale est aussi modifiée. Le nasion se situe au-dessus de la ligne constituée par les points fronto-malaire temporaux en vue frontale.

Dans son ensemble, l'écaille des *Homo sapiens* préhistoriques est plus curviligne et plus épaisse en vue latérale.

VII.3 Comparaison des modélisations tridimensionnelles des espèces du genre *Homo* sans les *Homo sapiens* historiques ni les premiers *Homo*

Nous présentons le résultat d'une superposition Procuste suivie d'une Analyse en Composantes Principales concernant les espèces du genre *Homo* sans y inclure les *Homo sapiens* historiques ni les premiers *Homo*. Cette portion de l'étude a pour but de mieux appréhender les relations entre les différentes espèces d'Hominidés comprises entre 2 millions d'années et la fin du Pléistocène supérieur. Nous nous limitons à la modélisation du crâne et de la calotte crânienne au moyen de 19 points de repères craniométriques. Nous supprimons aussi les spécimens Néandertaliens juvéniles.

VII.3.1 Modélisation du crâne avec 24 points de repères craniométriques, sans *Homo sapiens* historiques ni premiers *Homo*

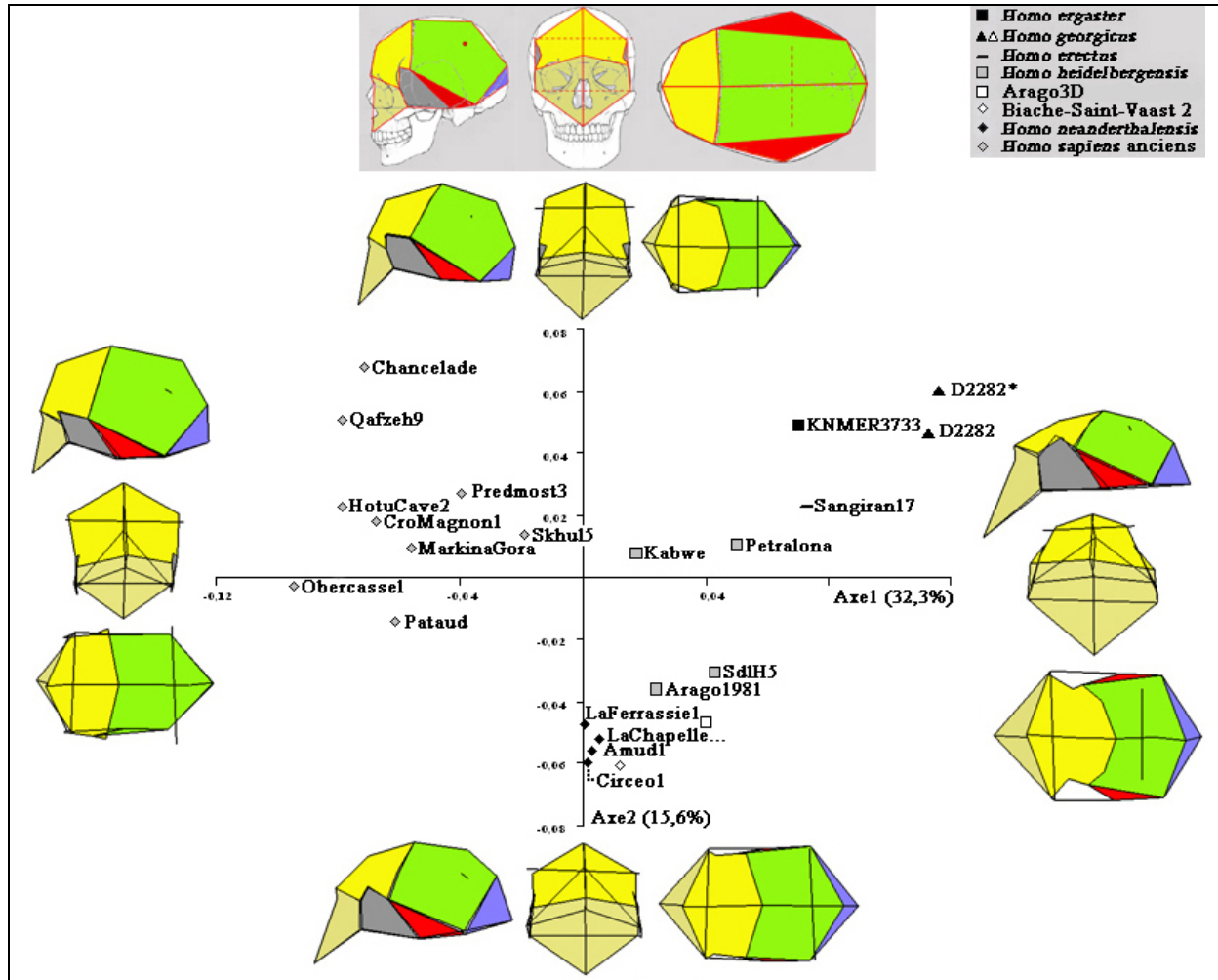
L'axe 1 explique 32,3% de la variance totale des spécimens étudiés contre 15,6% pour l'axe 2 (figure 253). Ces deux axes représentent 47,9% de la variance totale (graphique 14).

Le passage de la valeur maximale de l'axe 1 (D2282* modifié) à sa valeur minimale (Obercassel) nécessite une réduction des largeurs bilatérales de la partie inférieure du crâne (bijugale, biporion, biastérique et entre les points fronto-malaires temporaux) avec accroissement des largeurs supérieures (entre les points fronto-temporaux, entre les bosses pariétales, bisphénique et bistéphanique). Ceci permet la réduction de la constriction post-orbitaire jusqu'à un stade presque inexistant. La zone temporale est masquée par la voûte bipariétale en vue supérieure. Au niveau postérieur, la réduction de la largeur biastérique contribue à réduire l'angle astérion – lambda – astérion.

Dans le plan sagittal le passage des valeurs positives aux valeurs négatives de l'axe 1 correspond à un prosthion plus postérieur (réduction du prognathisme maxillaire). La modélisation de l'os frontal est plus bombée du fait d'une avancée du métopion (plus haut par rapport à la ligne bregma – lambda) ce qui allonge l'écaille supérieure de l'os frontal avec un positionnement plus haut du bregma. L'opisthocranion se rapproche du lambda en projection horizontale. Le contour sagittal est de plus en plus courbé en allant des valeurs négatives à positives de l'axe 1 (tendance à la brachycéphalie).

Le passage des valeurs minimales de l'axe 2 (Circeo 1) à ses valeurs maximales (Chancelade) nécessite d'autres modifications morphologiques. Le bregma est plus haut tout comme les stéphanions qui se rapprochent de l'axe médian, donnant une modélisation

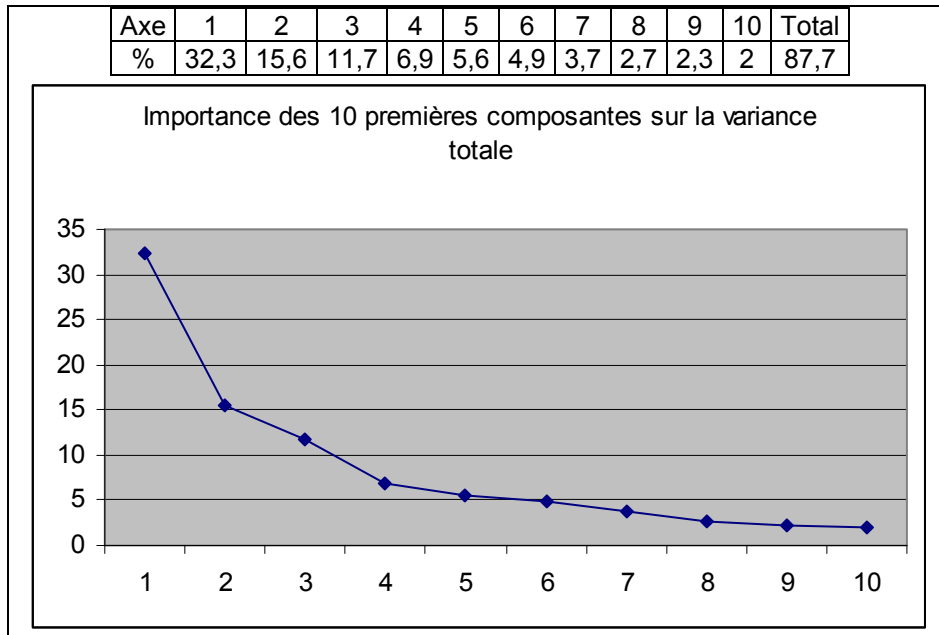
tridimensionnelle plus étroite en vue frontale, phénomène accentué par des largeurs bilatérales moindres sur l'ensemble du crâne. Les bosses pariétales sont plus antérieures en vue sagittale. Nous constatons une voûte sagittale plus curviligne en allant vers les valeurs positives.



Nous obtenons une forte discrimination des *Homo sapiens* préhistoriques et des Néandertaliens. Nous pouvons rattacher aux Néandertaliens la conformation tridimensionnelle de notre reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2, et souligner la proximité de Sima de los Huesos 5 et de notre proposition de reconstitution Arago3D. Kabwe ne diffère des *Homo sapiens* préhistoriques que par l'axe 1.

Les modélisations virtuelles de D2282 (aussi bien l'original que notre proposition) présentent une conformation plus archaïque que celle de KNM-ER 3733. Notre proposition a

une valeur supérieure sur l'axe 2 par rapport à l'original. Ceci correspond à la réduction du prognathisme maxillaire.



Graphique 14: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques, d'individus du genre *Homo*, sans *Homo sapiens* historiques ni premiers *Homo*.

VII.3.2 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 19 points de repères craniométriques, sans *Homo sapiens* historiques ni premiers *Homo*

L'axe 1 explique 23,3% de la variance totale des individus étudiés contre 15,1% pour l'axe 2 (soit 38,4% pour les deux ; graphique 15 ; figures 254 et 255).

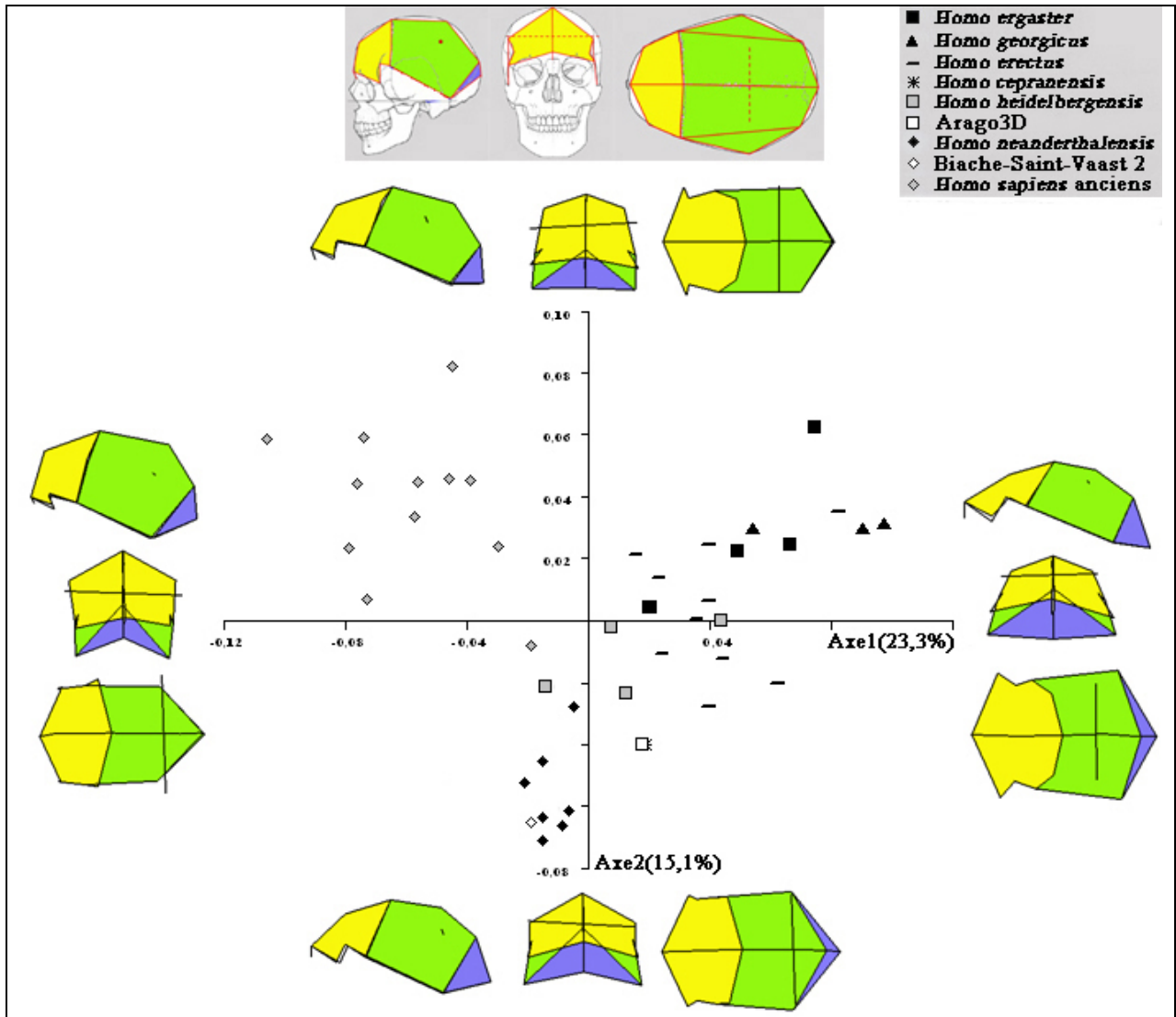


Figure 254 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne de spécimens du genre *Homo* en 19 points de repères craniométriques, sans *Homo sapiens* historiques ni premiers *Homo*.

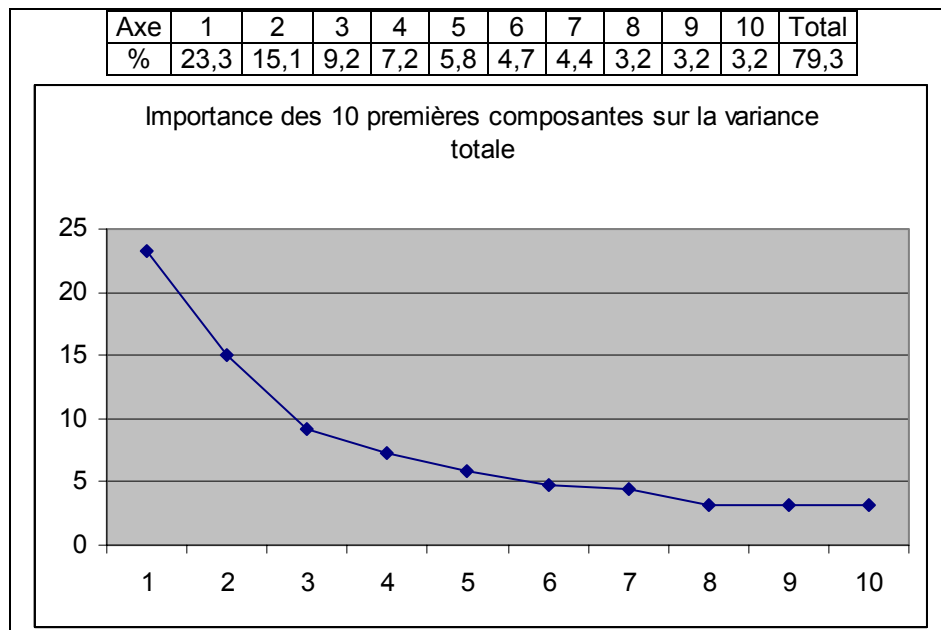
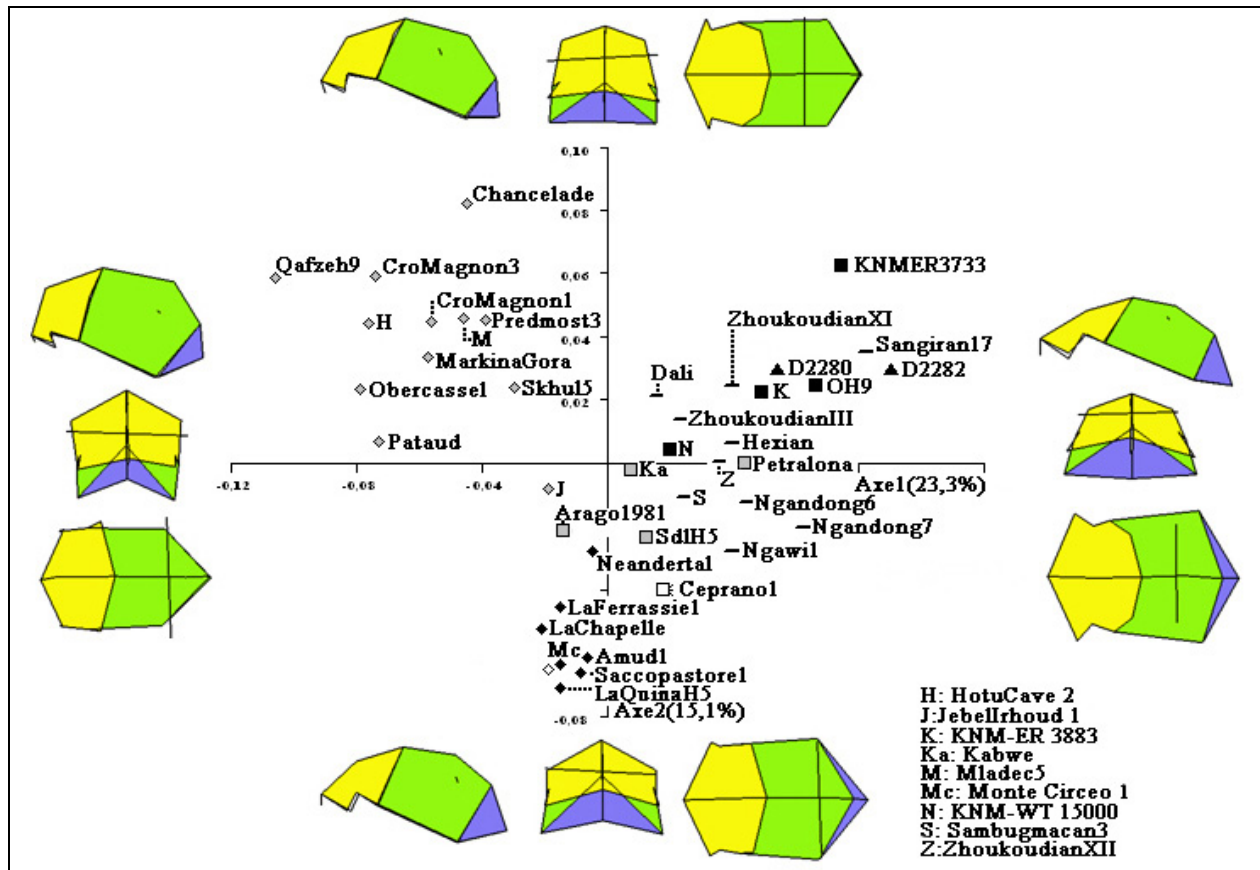
Le passage de la valeur maximale de l'axe 1 (D2282) à sa valeur minimale (Qafzeh9) nécessite : 1/ La réduction de la largeur postérieure inférieure de la calotte crânienne (astérions plus internes, plus avancés et plus bas) ; 2/ L'accroissement de sa largeur antérieure inférieure (sphénions et points fronto-temporaux plus externes) ; 3/ La réduction de la constriction post-orbitaire (diminution de la largeur entre les points fronto-malaires

temporaux et accroissement de la largeur minimale plus antérieure). Les largeurs supérieures (entre les bosses pariétales et les stéphanions) s'accroissent avec un positionnement plus externe de ces points. La calotte crânienne devient plus bombée en section frontale en allant des valeurs maximales aux valeurs minimales de l'axe 1. L'opisthocranion est plus antérieur, phénomène accentué par le recul et l'élévation du lambda. Le bregma est plus antérieur et plus haut. L'élévation de ces points de repères correspond à un bombement de la voûte crânienne et entraîne une élévation du sagittum et du métopion.

En allant des valeurs maximales aux valeurs minimales de l'axe 1, nous passons d'une calotte crânienne sphéroïde à une calotte crânienne de type pentagonoïde en vue supérieure. La calotte crânienne est plus bombée, plus circulaire sagittalement.

Le passage des valeurs maximales (Chancelade) aux valeurs minimales (La Quina H5) de l'axe 2 correspond à : 1/ Un recul des bosses pariétales en vue latérale ; 2/ Une position plus basse des stéphanions en vue frontale ; 3/ Un sagittum plus antérieur sur la suture sagittale ; 4/ Un nasion antérieur ; 5/ Une glabellle, un lambda et un opisthocranion plus hauts. En vue supérieure, la largeur générale de la calotte crânienne s'accroît dans son ensemble.

La population d'*Homo sapiens* préhistoriques est parfaitement discriminée à l'exception de Jebel Irhoud 1, proche de Kabwe (suivant l'axe 2) et de la calotte crânienne de l'Homme de Neandertal (suivant l'axe 1). La modélisation tridimensionnelle de Biache-Saint-Vaast 2 ne peut être séparée des Néandertaliens, eux-mêmes bien distincts (sauf Neandertal plus distant).



Graphique 15: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne en 19 points de repères craniométriques, sans *Homo sapiens* historiques ni premiers *Homo*.

Chap. VIII : DISCUSSION

Avant d'aborder en détail les différentes analyses portant sur les Hominidés étudiés, nous discuterons des intérêts et limites des trois propositions de reconstitutions virtuelles réalisées : Arago3D, Biache-Saint-Vaast 2 et Dmanissi D2282*.

VIII.1 Reconstruction du crâne Arago3D

La reconstruction du crâne Arago 21-47 a été réalisée en deux étapes:

- Le positionnement des fossiles Arago 21 – 47 (et 47A et 3A) ;

- La réalisation de la chimère Arago3D en prélevant virtuellement des fragments sur le crâne de Ceprano 1. Le terme de chimère est nécessaire et non péjoratif car il ne s'agit, quelles que soient les analyses et études réalisées pour obtenir cette reconstruction théorique. Nous n'invalidons pas le travail réalisé, mais tenons à souligner qu'il ne s'agit que d'une possibilité de reconstruction, réalisée avec des fragments allochtones. Cette proposition virtuelle pourra être modifiée en fonction des prochaines découvertes dans la Caune de l'Arago. Grâce à la souplesse de l'outil informatique, cette proposition pourra évoluer. Tout nouveau fragment du crâne pourra ainsi être virtuellement intégré à la proposition Arago3D.

La proposition de reconstruction Arago 21-47 n'est constituée que de fragments originaux et non de fragments allochtones. Alors que les fragments pariétaux droits et gauche n'ont nécessité que des travaux de positionnement tridimensionnels, la face, déformée par une pression latérale gauche, a fait l'objet d'un travail de restauration virtuelle pour compenser ces déformations.

VIII.1.1 La face restaurée Arago 21

Nous avons symétrisé l'hémi-face droite suivant le plan sagittal et compensé ensuite les déformations surfaciques. Nous n'avons pas découpé virtuellement la portion gauche ayant basculée afin de la réarticuler pour les raisons suivantes :

- 1/ Les déformations intra-faciales auraient été complexes à compenser ;

- 2/ Il aurait été nécessaire de découper l'hémi-face gauche puis de la segmenter en découpant les différents fragments. Ceci aurait accru le nombre de fragments virtuels à articuler les uns par rapport aux autres, avec un risque d'erreur accrue. Plus le nombre de fragments à replacer augmente, plus le risque d'erreurs de positionnement s'accroît. Le

contexte est différent de celui de la reconstruction de St-Césaire (ZOLLIKOFER *et al.*, 2002b). Le fossile était fracturé, mais non déformé.

La symétrisation suivie d'un découpage de trois fragments de l'écaille cérébrale frontale nous est apparue comme la meilleure solution.

Une fois la face restaurée, l'articulation des fragments antérieurs des deux pariétaux (47A et 3A) et leur inclinaison par rapport à l'os frontal, permettent de confirmer le tracé de la suture coronale obtenu ainsi que la courbure de l'écaille frontale cérébrale.

VIII.1.2 Les os pariétaux Arago 47 – 47A – 3A

La mise en place du fragment principal du pariétal droit (Arago 47), sa localisation spatiale et son articulation peuvent faire l'objet de discussions.

En effet, l'articulation entre la face Arago 21 et le fragment pariétal principal Arago 47 n'est possible que sur une portion limitée, millimétrique. La difficulté dans un assemblage virtuel, sans utilisation d'une interface spéciale avec retour de force, réside dans l'incapacité de définir à quel moment les pièces se chevauchent avec développement d'une résistance de contact. Pour compenser cela, l'expérimentateur peut :

- Soit expérimenter avec des moulages et tester les différentes positions envisagées ;
- Soit utiliser l'imagerie numérique et étudier la modélisation des zones de contact au moyen de coupes virtuelles et les comparer à celles de zones correspondantes pour d'autres fossiles.

Après avoir pré-positionné le pariétal Arago 47 en fonction de la zone d'engrènement (au-dessus du sphénion droit) et du plan sagittal modélisé à partir de la face, nous avons généré l'image gauche du pariétal. Ceci permet de modéliser la courbure sagittale de la voûte bipariétale et d'étudier la position de celle-ci par rapport à la face. L'obtention d'une face restaurée (nouvelle suture coronale) et le positionnement des fragments antérieurs des pariétaux droit et gauche permettent de mieux appréhender les relations entre Arago 47 et son image dans le plan frontal.

Du fait de la possibilité de combinaison spatiale différente d'Arago 47, ce travail peut être discuté en arguant d'une position différente de certains points de repères dans l'espace. Nous opposons deux éléments contre cet argument :

1/ Le positionnement d'une telle structure courbée latéralement et antéro-postérieurement dans l'espace s'avère assez complexe. Le moindre mouvement de bascule en un point se répercute immédiatement sur l'ensemble de la structure. Au cours des nombreux essais, il nous est arrivé de trouver une position de contact correcte mais un examen des

différents angles générés a alors indiqué que le positionnement spatial était erroné (valeurs aberrantes de l'angle astérion – lambda – astérion). Au final, le champ de variabilité des positions envisageables est assez réduit ;

2/ La calotte crânienne de Ceprano 1 présente des similitudes de conformation avec notre proposition de reconstruction d'Arago 21-47, au niveau de l'os frontal et de la voûte bipariétale. Nous discuterons plus loin de l'intérêt d'utiliser Ceprano 1.

En raison du chevauchement des différentes structures anatomiques et courbures des deux modélisations virtuelles, la nouvelle hypothèse d'articulation d'Arago 47 nous semble plus cohérente.

La symétrisation du pariétal droit pour obtenir le pariétal gauche est l'étape intermédiaire entre la restauration du fossile et la réalisation d'une chimère par intégration et articulation de fragments allochtones. L'obtention d'un pariétal symétrique est nécessaire pour terminer la restauration car il permet de mieux articuler les fragments antérieurs des pariétaux droit et gauche (Arago47A et Arago3A). Nous considérons donc cette étape comme faisant partie de la restauration du fossile Arago 21-47, dernière phase avant l'établissement de la chimère Arago3D.

VIII.1.3 Intérêts et limites de l'utilisation de Ceprano 1 pour réaliser la chimère Arago3D

L'utilisation de l'*Homo cepranensis* Ceprano 1 (MALLEGNI *et al.*, 2003) comme source de fragments allochtone pour reconstituer un *Homo heidelbergensis* peut faire l'objet de discussions.

Ceprano 1 a été daté entre -700 000 ans (ASCENZI *et al.*, 1996) et -800 000/-900 000 ans (BRUNER *et al.*, 2005) contre -450 000 ans pour Arago 21-47 (YOKOYAMA *et al.*, 1991) soit une différence de 250 000 à 350 000/450 000 ans ;

Ce fossile italien, l'un des plus anciens restes humains connus en Europe, est fragmentaire et a été déformé. La calotte crânienne présente de nombreuses fractures, notamment au niveau de la voûte bipariétale. L'assemblage et l'articulation de ces fragments a ainsi fait l'objet de discussions (ASCENZI *et al.*, 1996, 2000 ; CLARK, 2000), notamment concernant les fragments de la voûte bipariétale.

Nous n'avons donc pas utilisé Ceprano pour articuler Arago 47 par rapport à Arago 21. Par contre nous l'avons utilisé pour étudier la vraisemblance de notre hypothèse de reconstruction. Nous avons comparé les caractères morphologiques de la voûte bipariétale de

Ceprano 1 (épaisseur, robustesse, présence d'un torus angularis, courbure des fragments les plus complets) et constaté une similitude anatomique entre les deux fossiles. Au niveau de l'os frontal, les deux fossiles présentent une divergence d'écaille frontale semblable et un torus supra-orbitaire massif. La superposition des sutures coronales des deux individus ne présente pas de différences. Les facettes temporales de l'os frontal sont semblables.

L'os frontal ainsi que l'os occipital de Ceprano 1 sont relativement peu déformés. Leur conservation permet d'obtenir les largeurs antérieures et postérieures de la voûte bipariétale. Ces valeurs sont semblables à celles relevées sur Arago3D, tout comme les distances astérion-sphénion, correspondant aux longueurs des os temporaux.

Nous avons donc choisi de prélever l'os occipital et les os temporaux de Ceprano 1 pour les intégrer à notre chimère Arago3D. Le positionnement des os temporaux et de l'occipital sur la chimère n'a pas nécessité de modification de taille ou de forme. Les os temporaux sont aussi incomplets, mais leur utilisation permet de positionner spatialement les fragments basilaires Arago 78-79.

Cette intégration des derniers fragments Arago et la correspondance des structures anatomiques permettent de montrer la vraisemblance de la chimère. Ainsi l'écaille de l'os temporal gauche recouvre correctement la zone de suture du symétrique d'Arago 47. Les grandes ailes du sphénoïde sont articulées avec la portion antérieure des temporaux droit et gauche. L'os occipital de Ceprano 1 s'intègre parfaitement à l'espace astérion – lambda – astérion généré par le positionnement des deux pariétaux. L'apophyse basilaire avec les condyles occipitaux permet de confirmer le positionnement des os temporaux, en se fondant sur les structures anatomiques communes à l'occipital et aux os temporaux (échancrures et fosses jugulaires).

En raison de l'état de conservation du sphénoïde d'Arago 21 (avant et après restauration), il nous est impossible de préciser si les fragments Arago 78 et 79 font partie du même individu qu'Arago 21, 47, 47a et 3A.

VIII.1.4 La chimère Arago3D et la chimère Arago1981

L'articulation et la position spatiale des fragments osseux allochtones (os occipital et temporaux) dépend grandement de la courbure sagittale et du contour crânien dans le plan frontal préalablement établis lors de l'assemblage Arago 21–47. Notre projet diffère de la précédente proposition sur de nombreux points. Nous ne discuterons que des différences.

Notre proposition nécessite aussi l'utilisation de fragments allochtones provenant d'une autre espèce, *Homo cepranensis*, un Anténéandertalien suivant la définition de Lumley

et al. (1985). L'utilisation d'un Anténéandertalien (même d'une espèce différente) nous paraît plus appropriée d'un point de vue phylétique que l'utilisation de fragments d'*Homo erectus*.

La voûte bipariétale d'Arago3D est plus large postérieurement (accroissement de la largeur bi-astérique M12 et de l'angle astérion – lambda – astérion). Cet accroissement correspond aux remarques de E. Spitery (1982, 1984) et est lié à un astérion plus externe, par rapport au plan sagittal et plus haut par rapport à l'ancienne proposition. Les bosses pariétales sont plus hautes du fait du relèvement des extrémités pariétales.

Suite à ce mouvement de l'angle postéro-inférieur d'Arago47, Arago3D ne présente plus d'angulation bipariétale postérieure, ni de suture sagittale convexe. Ce mouvement entraîne aussi l'accroissement de la largeur maximale bipariétale (M8), de la largeur maximale crânienne, de la largeur biporionique. Cependant le relèvement de la voûte bipariétale nécessite une réduction de la corde bregma – lambda (M30) ainsi que de la lacune sagittale entre Arago 47 et 47A. Le lambda est ainsi légèrement antérieur dans le plan sagittal. Ceci est confirmé par la réduction des distances nasion/glabelle – lambda, même si ces mesures sont aussi dépendantes de la modification de la face. L'accroissement de l'angle bregma – sagittum – lambda ne peut être lié directement à cette réduction de la corde bregma – lambda (M30), et dépend plus du nouveau positionnement relevé du fragment Arago 47 par rapport à Arago 47A.

Notre restauration de la face Arago 21 est plus allongée au niveau de l'écaille frontale (corde M29). Cet allongement permet d'accroître l'angle frontal (M32.5) ce qui correspond à une écaille frontale moins courbée que sur la précédente reconstitution. Le massif facial restauré présente un aspect différent : deux arcades orbitaires rectangulaires et larges, du type de celles observées sur les autres *Homo heidelbergensis*. Le torus supra-orbitaire est massif et quasi continu, de type II/III suivant la nomenclature de Cunningham, surmonté d'une dépression supraglabellaire et d'une fosse sus-orbitaire large et peu profonde comme c'est le cas pour certains *Homo heidelbergensis*.

La contraction post-orbitaire est moindre (I72') alors que la divergence de l'écaille (I12) est accrue. Ceci résulte de l'accroissement de la largeur frontale minimale (M9) supérieur à celui de la largeur du torus orbitaire (M43') et d'une hausse plus importante de la largeur frontale maximale (M10). Les portions de l'écaille au-dessus et au-dessous de cette largeur maximale ont aussi été accrues (largeur bistéphanique M10b et largeur bisphénique).

Ces différentes valeurs permettent de mettre en évidence un élargissement supérieur de l'écaille frontale. Il correspond à l'élargissement de la voûte bipariétale et à l'écartement

précédemment évoqué de ses bords temporaux, ceci en dépit de la réduction de certaines valeurs angulaires telles que l'angle sphénion – bregma – sphénion et l'angle bregma – stéphanion – sphénion. La réduction de ces angles est explicable : le fort accroissement de la largeur bistéphanique (M10b), supérieur à celui de la largeur bisphénique entraîne une réduction de l'angle bregma – stephanion – sphénion. Cette modification contribue dans le plan frontal à renforcer l'aspect divergent de l'écaille de la nouvelle reconstruction proposée.

La réduction de l'angle sphénion – bregma – sphénion est liée à la diminution de courbure de l'écaille frontale. Le bregma se situe plus haut dans l'espace et ceci contribue à réduire l'angle mesuré.

Le massif facial est plus large au niveau de l'os frontal et de la face proprement dite. Les largeurs biorbitaires interne et externe (M43) se sont accrues, comme la largeur bijugale et la largeur zygomaxillaire (M46). Au niveau du palais, ainsi que de l'arcade dentaire, nous constatons également un accroissement des largeurs mesurées virtuellement.

Il ressort de toutes ces constatations que la compensation de la déformation de la face Arago 21 n'a pas été réalisée de la même manière sur chaque reconstruction. Alors qu'Arago1981 présentait encore une asymétrie marquée, la face d'Arago3D est symétrique du fait du protocole informatique utilisé.

Arago3D présente des largeurs accrues par rapport à Arago 1981, un neurocrâne plus aplati (réduction de la distance bregma-basion) et un os frontal moins courbé.

Nous suggérons que la chimère ou reconstruction Arago1981, réalisée avec des moyens différents, et qui présente quelques défauts ne pouvant être évités avec ces techniques, soit remplacée par notre proposition Arago3D.

La position phylétique de cette nouvelle proposition sera traitée plus loin dans ce chapitre.

VIII.2 Analyse de la reconstruction virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2

Le simple inventaire des fragments osseux fossiles retrouvés souligne la complexité du travail réalisé. En effet, reconstituer un crâne à partir seulement de la zone orbitaire frontale, un pariétal gauche incomplet, un temporal gauche fragmentaire et un reliquat d'occipital s'est avéré difficile et peut être sujet à caution. L'articulation de fragments osseux isolés les uns par rapport aux autres est difficile sans zone de contact. Nous n'avons pas eu la chance d'avoir

une telle zone comme pour Arago3D. Afin de faciliter ce travail de reconstruction la méthode numérique a été préférée à l'utilisation de moulages en plâtre.

L'absence d'articulations directes nous a amené à chercher un crâne de référence afin de positionner virtuellement ces fragments les uns par rapport aux autres. La datation du site (SOMME *et al.*, 1988) et sa localisation ne nous ont fait choisir que des crânes d'*Homo heidelbergensis* d'Europe et d'*Homo neanderthalensis*. Nous avons ensuite discriminé, au sein de ces individus, le spécimen le plus semblable morphologiquement.

Nous avons sélectionné le spécimen fossile de Krapina 3, cranium C. Au sein des moulages d'Hominidés fossiles auxquels nous avons eu accès (Laboratoire d'Anthropologie, Faculté de Médecine, Secteur Nord, Marseille, 2003), cet individu présente la zone frontale (arcades et début de l'écaille) la plus semblable morphologiquement au niveau de la région du nasion, dans la verticalisation de cette zone et la formation d'un angle presque droit au niveau de la glabelle avec la base de l'écaille frontale. Nous l'avons donc retenu comme référence.

Nous avons comparé ces fossiles aux fragments gauches de pariétal et de temporal de Biache-Saint-Vaast 2, notamment au niveau des sutures et des proportions. Krapina 3 n'ayant plus que le pariétal droit, nous avons généré l'image gauche de celui-ci par symétrie sagittale. Ce pariétal image est celui correspondant le plus aux fragments de Biache-Saint-Vaast 2. Nous avons constaté une bonne superposition des lignes temporales inférieure et supérieure du pariétal, une similitude des dimensions, du tracé des sutures pariéto-temporale et lambdatique ainsi que de la morphologie de la base de l'apophyse zygomatique. Nous n'avons pu comparer la portion postérieure du foramen magnum de BSV 2 avec Krapina 3. Bien que semblables, les deux spécimens ne sont pas totalement identiques. Nous avons donc seulement utilisé Krapina 3 comme support pour orienter les fragments de Biache-Saint-Vaast 2, les articuler virtuellement. Les fragments pariétaux et frontaux de BSV 2 ne sont pas en articulation directe, mais se recouvrent sur quelques millimètres.

La symétrisation du bloc pariéto-temporal permet d'obtenir la largeur maximale du crâne. Nous avons ensuite modélisé le sommet de la voûte bipariétale et l'occipital. Pour ce faire nous nous sommes intéressés aux fragments postérieurs de Biache-Saint-Vaast 1 ignorés dans la première partie de l'étude en raison de l'absence de l'os frontal.

Nous avons envisagé que BSV 2 soit de sexe féminin du fait de cette grande similitude avec les deux autres fossiles (Krapina 3 et BSV1) considérés comme féminin (contour sagittal de la zone glabellulaire, similitude des dimensions). Mais alors que la morphologie générale est identique, les insertions musculaires sont toujours plus marquées sur BSV 2 que sur les deux

autres, tout comme les épaisseurs de l'écaille pariétale postérieure. Nous estimons qu'il s'agit bien d'un dimorphisme sexuel et que BSV 2 était de sexe masculin.

Nous avons constaté en comparant les blocs pariéto-temporaux (leur morphologie, leur conformation et les tracés des sutures) et en faisant abstraction des déformations subies par le fossile BSV 1, que les deux spécimens de Biache-Saint-Vaast avaient une morphologie semblable. Les tracés des sutures et les points de repères craniométriques utilisés (astérion, incisure pariétale, porion) se superposent et ont les mêmes tracés et angulation à leur croisement. Cette similitude (ainsi que la portion postérieure de l'écaille pariétale) rend vraisemblable l'hypothèse de présence d'un chignon occipital sur Biache-Saint-Vaast 2.

Autre élément de décision, les caractères relevés sur les fragments de BSV 2 correspondent plus à ceux des Néandertaliens qu'aux *Homo heidelbergensis* (le processus mastoïdien de BSV 2 aussi petit que celui de Néandertaliens comme Krapina 3, La Chapelle-aux-Saints et La Ferrassie 1 ; le porion dans l'axe de l'apophyse zygomatique). Cette similitude plus importante avec les Néandertaliens, qui avaient tous un chignon occipital (plus ou moins marqué), qu'avec les *Homo heidelbergensis* pour qui le chignon occipital est occasionnel, nous conforte dans notre choix d'attribuer un chignon occipital à notre chimère de Biache-Saint-Vaast 2. Le choix de la profondeur de la dépression pré-lambdatique ne dépend ensuite que du choix de l'occipital choisi pour réaliser la chimère.

Nous avons ensuite modélisé une écaille frontale ainsi qu'une face et des arcades zygomatiques sur notre proposition en modifiant virtuellement par déformation libre des polygones la face de Krapina 3. L'objectif de cette étape a été, en raison de l'état fragmentaire de BSV 2, non pas de dire « voici comment était le fossile à l'origine », mais de valider ou non la position des fragments en recherchant des zones d'aberration anatomique tel qu'un changement brutal d'inclinaison entre l'écaille frontale cérébrale et l'écaille pariétale supérieure.

Le frontal devait être fuyant, surmontant une dépression supraglabellaire et une fosse sus-orbitaire large et peu profonde comme chez de nombreux *Homo heidelbergensis* et *Homo neanderthalensis* (Arago3D, Petralona, Sima de los Huesos 4 & 5, Krapina 3 & 15, Neandertal, Shanidar 1, La Chapelle-aux-Saints, La Ferrassie 1,...). L'arcade sourcilière gauche, totalement soudée, permet de classer le torus dans le type III de la classification de Cunningham (1908) comme tous les *Homo heidelbergensis* d'Europe (excepté Arago 21, type II/III) et tous les Néandertaliens. La portion supérieure des cavités orbitaires a un contour

circulaire, différant de celui des *Homo heidelbergensis* et rappelant celui des *Homo neanderthalensis*. L'étude de l'arcade orbitaire et de l'apophyse orbitaire externe droite montre une surface vermiculée considérée longtemps comme un caractère appartenant à la majorité des Néandertaliens et à quelques autres Hominidés récents (TAPPEN, 1978). Cette non exclusivité ne permet donc pas d'attribuer formellement Biache-Saint-Vaast 2 à l'espèce néandertalienne.

La présence d'une structure comparable au torus angularis est un caractère plésiomorphe non retrouvé chez les Néandertaliens. Mais le fait qu'elle soit assez large en son extrémité postérieure et relativement aplatie en son milieu la distingue de celle observée chez Arago 47. Elle apparaît intermédiaire entre les *Homo heidelbergensis* qui précèdent ce fossile et les *Homo neanderthalensis* qui lui succèdent chronologiquement.

La courbure de l'écaille latérale de l'os pariétal est limitée, et est verticale par rapport à celles de certains Néandertaliens classiques (Monte Circeo 1, La Ferrassie 1, La Chapelle-aux-Saints, La Quina H5) mais est semblable à celles d'Amud 1 et de Sima de los Huesos 5.

Au niveau de l'os temporal, il ne subsiste de l'apophyse zygomatique que la tubérosité zygomatique antérieure. Le condyle est intact tout comme le conduit auditif externe qui se situe dans l'axe de l'apophyse zygomatique. Ceci est un caractère de néandertalien typique (Monte Circeo 1, La Chapelle-aux-Saints, Spy 2, La Ferrassie 1) alors que le conduit auditif présente une position inférieure chez les *Homo sapiens* (Pataud, Cro-Magnon 1) et Kabwe. Le conduit auditif externe de Biache-Saint-Vaast 2 a une forme proche de celle elliptique avec un grand axe oblique en avant et en bas de La Chapelle-aux-Saints (PATTE, 1955 ; CONDEMI, 2003).

Le processus mastoïdien est court et peu allongé par rapport à celui de Sima de los Huesos 5 (aussi étroit en vue frontale mais plus grand). Ce processus est plus petit chez BSV 2 que chez les Néandertaliens classiques étudiés (Monte Circeo 1, La Ferrassie 1, La Chapelle-aux-Saints, La Quina H5).

Nous estimons après ce travail de comparaison et de reconstruction que ce fossile peut être considéré comme Anténéandertalien (LUMLEY, 1973 ; LUMLEY *et al.*, 1985), parmi les derniers spécimens précédant les Néandertaliens classiques (CAMERON *et al.*, 2004a). Déterminer la position phylétique de ce fossile à une espèce d'Hominidé est assez difficile en

raison de la mosaïque de caractères plésiomorphes des *Homo heidelbergensis* (torus angularis visible même s'il est peu marqué) et ceux autapomorphiques des *Homo neanderthalensis* (conduit auditif externe et axe de l'apophyse zygomatique, forme des arcades frontales, chignon occipital).

Chronologiquement (SOMME *et al.*, 1988) le site de Biache-Saint-Vaast est estimé entre -149 000 et -201 000 ans B.P avec une tendance vers -200 000 ans. Cette datation correspond à la période charnière entre les derniers *Homo heidelbergensis* d'Europe et les premiers Néandertaliens reconnus comme tels entre et -120 000 et -100 000 ans (Krapina ; RINK *et al.*, 1995 ; Saccopastore 1 & 2 ; MANZI *et al.*, 1991 ; CONDEMI, 1992, 2003).

Nous essayerons de trancher davantage en analysant les résultats de notre chimère dans les superimpositions Procustes.

VIII.3 Analyse de notre proposition virtuelle du crâne de Dmanissi D2282*

La modification du crâne de Dmanissi D2282* par la compensation de ses déformations a été nécessaire afin d'avoir une meilleure vision de ce à quoi devaient ressembler les Hominidés découverts à Dmanissi, les quatre crânes connus (GABUNIA *et al.*, 2000; VEKUA *et al.*, 2002 ; LORDKIPANIDZE *et al.*, 2005) présentant chacun des différences morphologiques. Les autres individus, D2280, D2700, D3444, ont en vue postérieure une forme conique – triangulaire pour D2700 contre une forme pentagonale à sommet courbé pour D2280 et une forme identique entre eux pour D2282* et D3444 avec un sommet d'aspect pentagonal et une base temporale bien plus large que la voûte bipariétale. La comparaison entre D3444 et D2282* ne peut être totalement réalisée en vue postérieure en raison de l'enfoncement du plan nuchal droit de ce dernier. Il est aussi difficile de comparer directement les blocs fronto-maxillaires de D3444, D2700 et D2282* en raison de la déformation de la face de celui-ci et du décalage latéral du maxillaire et son mouvement de bascule sagittale par rapport au frontal.

Suite au désassemblage des fragments déplacés et comprimés et à leur nouveau positionnement nous obtenons ainsi une face présentant un prognathisme maxillaire moindre, plus proche d'aspect en vue latérale de D2700 (VEKUA *et al.*, 2002).

Après n'avoir travaillé que sur les images tomodensitométriques des originaux de D2282 et D2280 (coupes 1 mm) nous estimons nécessaire de prolonger ce travail avec un examen approfondi du fossile original afin de mieux déterminer les articulations entre les fragments, les différents types de cassure, et d'affiner le positionnement des fragments.

VIII.4 Position phylétique des Hominidés reconstitués : Arago3D, Biache-Saint-Vaast 2 et Dmanissi D2282*

VIII.4.1 *Australopithecus africanus* et premiers *Homo*

Les deux spécimens d'*Australopithecus africanus* présentent des conformations tridimensionnelles semblables à celles des premiers *Homo* étudiés lors des comparaisons Procustes avec les Grands Singes. Cependant, nous constatons une différence de conformation tridimensionnelle entre Sts 5 et Sts 71, ceci quelle que soit la modélisation étudiée (os frontal, voûte bipariétale, crâne en 24 points). Les spécimens de premiers *Homo* étudiés ont systématiquement une conformation intermédiaire entre celles de Sts 5 et Sts 71.

Plusieurs hypothèses sont envisageables pour expliquer cette différence générale de conformation tridimensionnelle. Les différences conformationnelles entre les deux spécimens pourraient : résulter d'une mauvaise symétrisation de l'hémi-crâne droit de Sts 71 ; correspondre à un dimorphisme sexuel ; correspondre à une mauvaise attribution phylétique pour l'un des deux fossiles.

L'absence d'un effectif conséquent empêche de privilégier l'une de ces hypothèses. Nous ne pouvons seulement dire que Sts 71 présente des conformations tridimensionnelles du crâne, de la calotte crânienne, de l'os frontal et de la voûte bipariétale plus modernes que celles de Sts 5.

En raison des effectifs étudiés, nous n'avons pas pu analyser la variabilité sexuelle de chaque espèce, ainsi que la variabilité intraspécifique qui est mal connue. Nous avons donc fait abstraction de ces deux composantes dans cette discussion. De ce fait nous ne pourrions évaluer l'importance de la variabilité sexuelle dans la variation intra- et inter-spécifique.

L'écart constaté entre les *Australopithecus africanus* et les premiers *Homo* est différent suivant les populations de comparaison choisies. Ces deux groupes sont plus proches entre eux dans le cadre des Analyses en Composantes Principales avec les Grands Singes que lors des ACP prenant en compte les représentants du genre *Homo*. Ceci est dû au fait que les

différences conformationnelles avec les Grands Singes sont supérieures à celles relevées lors des comparaisons avec les représentants du genre *Homo*. Les différences entre les spécimens de Sterkfontein et les premiers *Homo* sont masquées par les différences entre ces individus et les Gorilles ou Chimpanzés.

Ceci nous permet de souligner la nécessité de pratiquer un grand nombre d'analyses différentes afin de recouper les informations relevées sur chacune d'elles ou de mieux discriminer les populations comparées.

Préciser l'origine du genre *Homo* nous est difficile en raison de la faiblesse de l'effectif étudié.

KNM-ER 1470 (*Homo rudolfensis*) et KNM-ER 1813 (*Homo habilis*) présentent des caractères mosaïques. Suivant l'ACP réalisée et la conformation spatiale analysée, l'un présente une structure plus moderne que l'autre (recul du prognathisme maxillaire, voûte sagittale plus haute et plus bombée). La calotte crânienne (21 et 19 points de repères craniométriques) de KNM-ER 1470 est moins large que celle de KNM-ER 1813 et plus curviligne sagittalement avec une voûte crânienne plus haute. La voûte bipariétale de KNM-ER 1470 est plus large que KNM-ER 1813 au niveau des stéphanions et des bosses pariétales alors que KNM-ER 1813 a une base (sutures pariéto-temporales) plus large. KNM-ER 1470 présente sur ces modélisations une conformation plus proche des espèces plus récentes chronologiquement. Par contre la modélisation de l'os frontal de KNM-ER 1813, bien que plus large, est moins allongée antéro-postérieurement.

KNM-ER 1470 est en général moins archaïque (calotte plus courbée et plus large en hauteur) que KNM-ER 1813, mais ce dernier est toujours proche morphologiquement (axes 1 et 2 des ACP) des autres représentants du genre *Homo*, en particulier de KNM-ER 3733. Detroit (2000) a aussi constaté cette similitude, mais avec un moindre effectif fossile. Bien que plus petit, KNM-ER 1813 a une conformation tridimensionnelle semblable à celle de KNM-ER 3733, mais aussi à celles des *Homo georgicus*. Nous considérons cet *Homo habilis* comme étant plus proche phylétiquement des *Homo ergaster* et *Homo georgicus* que KNM-ER 1470. KNM-ER 1470 pourrait être considéré, suivant Cameron *et al.* (2004a) comme faisant partie d'un autre phylum que celui conduisant aux *Homo sapiens*.

Les *Australopithecus africanus* tridimensionnellement sont proches des premiers *Homo* par rapport aux Grands Singes et aux Paranthropes, mais les premiers *Homo* sont moins proches de ces Australopithèques que des autres espèces du genre *Homo*. La proposition de Wood et Collard (1999a) de reclassifier des premiers représentants du genre

Homo en *Australopithecus habilis* et *Australopithecus rudolfensis* nous semble peu vraisemblable au regard des conformations tridimensionnelles.

VIII.4.2 *Homo georgicus*, *Homo ergaster* et *Homo erectus* africain

Homo georgicus constitue une charnière importante dans l'évolution du genre *Homo*. Il s'agit d'une des premières espèces humaines situées hors d'Afrique, chronologiquement proche des premiers *Homo* (LUMLEY *et al.*, 2002), et potentiellement à l'origine des phylums européens.

La présence de cette espèce aux portes de l'Europe (LORDKIPANIDZE, 1999) correspond à un changement d'implantation géographique de cette humanité archaïque qui se répand en Indonésie, Europe et Afrique en un court laps de temps : 1/ Modjokerto (-1,81 Ma ; HUFFMAN, 2001) ; 2/ Dmanissi (-1,81 Ma ; LUMLEY *et al.*, 2002) ; 3/ KNM-ER 3733 (-1,75 Ma ; WOOD, 1991). Parmi ces trois spécimens presque concomitants, l'extrême jeunesse de Modjokerto ne permet pas d'utiliser cet individu pour étudier la morphologie tridimensionnelle des premiers asiatiques connus. Ceci contribue à accroître l'importance des spécimens de Dmanissi et de procéder à leur restauration.

La conformation tridimensionnelle de notre proposition de reconstruction du crâne Dmanissi D2282* est plus semblable à KNM-ER 3733 que la modélisation du fossile original. Ce rapprochement est dû à la réduction du prognathisme maxillaire. Malgré cela, D2282* est toujours plus archaïque avec un prognathisme maxillaire supérieur à celui de cet *Homo ergaster*. Ce dernier présente des stéphanions plus externes (caractère plus moderne). Cependant la comparaison des deux espèces au moyen de la seule modélisation du crâne est limitée à un seul spécimen pour chaque espèce. La modélisation de la calotte crânienne nous permet de comparer deux *Homo georgicus* (D2280, D2282*), deux *Homo ergaster* adultes (KNM-ER 3733, KNM-ER 3883), un adolescent (KNM-WT 15000) et un *Homo erectus* africain (OH 9).

Alors que KNM-WT 15000 a une morphologie crânienne tridimensionnelle assez moderne (peut-être liée à la non apparition de caractères adultes entraînant une modification de la morphologie : stéphanions et sphénions plus externes, constriction post-orbitaire moindre, crâne plus curviligne et moins allongé), les autres spécimens présentent selon les ACP une similitude plus ou moins importante avec les *Homo georgicus*. Les calottes crâniennes de OH 9 et KNM-ER 3733 ont un tracé sagittal semblable à celui de D2282* et D2280 après mise à l'échelle des différents spécimens. La conformation tridimensionnelle de la calotte crânienne de KNM-ER 3883 est plus apomorphe avec un contour sagittal plus

bombé et plus haut. L'architecture spatiale du spécimen OH 9, considéré comme plus récent (-1,12 à -1,15 Ma ; LEAKEY *et al.*, 1982) que KNM-ER 3883 (-1,5 à -1,65 Ma ; WOOD, 1991) est plus plésiomorphe tridimensionnellement.

La voûte bipariétale des trois fossiles africains adultes est plus homogène, mais avec une voûte plus étirée vers le haut pour KNM-ER 3733 et moins allongée antéro-postérieurement que pour OH 9. KNM-ER 3733 est plus distinct des deux autres adultes lors de la modélisation de l'os pariétal isolé car les différences bilatérales, masquées lors de la modélisation bipariétale sont plus facilement observables en ne modélisant qu'un coté. Nous avons aussi une perte d'informations : les valeurs angulaires bilatérales.

KNM-ER 3883 présente l'os frontal le plus moderne des deux spécimens adultes d'*Homo ergaster*, le moins allongé antéro-postérieurement en vue supérieure, avec la moins forte constriction post-orbitaire.

A l'exception des Analyses en Composantes Principales portant sur la modélisation de la voûte bipariétale et sur l'os pariétal droit isolé, les modélisations de D2282* et de D2280 ont toujours été semblables à celles des *Homo ergaster* les plus plésiomorphes. Des deux *Homo georgicus*, D2280 a la conformation spatiale la plus moderne dans chaque cas. Nous supposons que cette différence entre les deux individus est due aux déformations crâniennes subies par D2282* et son plus jeune âge. L'inclusion de Dmanissi D2700 et D3444 dans une étude tridimensionnelle serait intéressante pour obtenir une meilleure représentation conformationnelle de l'espèce *Homo georgicus*.

En plus de leur proximité morphologique avec les *Homo ergaster*, les fossiles de Dmanissi sont relativement semblables à KNM-ER 1813 (les largeurs bilatérales sont légèrement accrues). La proximité de ces spécimens, chronologiquement proches, pourrait correspondre à une même origine phylétique des *Homo ergaster* et *Homo georgicus*, vraisemblablement un *Homo habilis* comme KNM-ER 1813. Ceci impliquerait, entre autres modifications, un accroissement de la taille des individus et du volume de la cavité cérébrale. Nous constatons la plésiomorphie de l'*Homo erectus* africain OH 9, peu différent des *Homo ergaster*.

Les différences constatées lors des différentes modélisations tridimensionnelles et des différentes Analyses en Composantes Principales ne sont pas en faveurs de liens phylétiques directs entre les *Homo georgicus* et les Anténéandertaliens étudiés. La modification morphologique nécessaire pour passer des spécimens de Dmanissi au plus ancien Anténéandertalien modélisé (Ceprano 1) est extrêmement importante. Nous ne pouvons

exclure l'hypothèse que ce peuplement ancien en Géorgie n'ait été à l'origine des Anténéandertaliens mais ceci aurait nécessité un changement morphologique radical et des étapes que nous ne retrouvons pas au niveau des fossiles. La présence avérée de sites avec activités anthropiques en Europe, échelonnés chronologiquement entre Dmanissi et Ceprano, montre que le genre *Homo* est présent depuis plus d'un Million d'années à Fuente Nueva-3 et Barranco León (OMS *et al.*, 2000), il y a 1 Ma dans le site du Vallonet (LUMLEY, 1988a, 1988b). L'absence de restes humains empêche de préciser s'il s'agit de phylums issus des individus présents à Dmanissi ou d'un ou de plusieurs autres peuplements successifs.

Les représentants des *Homo georgicus* ont, en vue postérieure, un contour de la calotte crânienne semblable à celui des *Homo habilis*. La calotte crânienne est large au niveau des os temporaux et des astérions. La largeur de la base de la voûte bipariétale (suture pariéto-temporale) est nettement inférieure à la largeur maximale au niveau des os temporaux. Ce n'est pas le cas pour KNM-ER 3733 dont la largeur de la base de la voûte bipariétale est presque identique à la largeur maximale au niveau des os temporaux. De plus, la voûte bipariétale des *Homo georgicus* est moins large et plus oblique que celle de KNM-ER 3733. L'écaille latérale des pariétaux de KNM-ER 3733 est plus verticale que celle de D2282* et D2280 et des *Homo habilis*, ce qui est un caractère apomorphe.

Nous considérerons en l'absence d'autres fossiles que les *Homo georgicus* constituent une espèce provenant des premiers *Homo* (*Homo habilis*) par cladogenèse quantique (TINTANT, 1983), tout comme les *Homo ergaster* et les premiers *Homo erectus*.. Gilbert *et al.* (2003) relèvent une proximité anatomique entre les deux *Homo georgicus* et KNM-ER 3733.

Les *Homo georgicus* pourraient être plus archaïques que les *Homo ergaster* et s'être diversifiés plus tôt que ceux-ci. Les *Homo ergaster*, dont KNM-ER 3733, pourraient avoir évolué depuis un ancêtre *Homo georgicus*. Ces deux espèces pourraient aussi être les descendants des *Homo habilis*, voir de différents groupes géographiques d'*Homo habilis*, ceux-ci pouvant s'être répandus hors d'Afrique.

VIII.4.3 *Homo erectus* asiatiques

En raison de la mauvaise conservation de leur face osseuse, nous avons surtout inclus les *Homo erectus* modélisés dans les Analyses en Composantes Principales de la calotte crânienne, de la voûte bipariétale et de l'os frontal. La population est étirée avec une

répartition oblique pour chaque ACP, polymorphe, mais constitue un groupe relativement homogène (l'écart entre deux spécimens proches est toujours faible suivant l'axe 1 et/ou l'axe 2 des ACP). La surface de dispersion de ce groupe (mais pas sa localisation) est en général comparable à celle des *Homo sapiens* préhistoriques.

La répartition est moins homogène lors de l'ACP correspondant à la modélisation de l'os pariétal isolé. Deux spécimens d'*Homo erectus* ont une conformation spatiale très archaïque : Sangiran 10 et Sangiran 17.

Sangiran 17 est le deuxième spécimen le plus archaïque dans le cadre de la comparaison des voûtes bipariétales. En l'absence d'information sur Sangiran 2 dans les autres modélisations (crâne, calotte bipariétale, os frontal), Sangiran 17 peut être considéré comme le spécimen d'*Homo erectus* ayant la conformation spatiale la plus plésiomorphe, la plus archaïque. Gilbert *et al.* (2003) relèvent aussi cet archaïsme par rapport aux autres *Homo erectus*. Par rapport aux autres individus, il présente la voûte sagittale la plus basse et la moins large en proportion au niveau des bosses pariétales et des stéphanions, et une forte constriction post-orbitaire. Le prognathisme maxillaire ne peut être comparé. Il s'agit aussi de l'individu ayant l'un des angles astérion – lambda – astérion les plus ouverts alors que l'angle se réduit avec les spécimens les plus proches chronologiquement des *Homo sapiens* (Sambungmacan 3, Dali).

Comment pouvons-nous interpréter l'archaïsme de la conformation spatiale de Sangiran 17 (calotte crânienne ayant une conformation semblable à celle de D2282*) par rapport aux autres *Homo erectus* ? Différentes hypothèses sont envisageables.

Le crâne fragmentaire de Sangiran 17 a une conformation archaïque par rapport aux autres *Homo erectus* car les fragments, notamment la face, ont été mal assemblés. La face originale présentait peut-être un prognathisme maxillaire moindre. Mais une trop grande antériorité du prosthion au cours de la reconstruction n'expliquerait que l'archaïsme du crâne (modélisation en 24 points) et non pour les autres modélisations (calotte crânienne, voûte bipariétale, os frontal). Nous ne pouvons donc retenir cette hypothèse pour expliquer les différences constatées au cours de toutes les ACP. Par contre nous ne pouvons rejeter la possibilité d'une trop grande antériorité du maxillaire.

La plésiomorphie de la voûte bipariétale et du pariétal droit (plus allongés antéro-postérieurement, sutures pariéto-temporales différentes) de Sangiran 10 et de Sangiran 17 par rapport à d'autres spécimens d'*Homo erectus* pourrait correspondre à une particularité régionale liée à l'insularité des spécimens (Java). Cependant d'autres spécimens découverts

aussi dans les strates de l'île de Java, Indonésie, présentent une conformation spatiale plus moderne (Sambungmacan 3, Ngawi 1, Ngandong 9).

Nous ne pouvons pas discriminer lors des ACP les modélisations tridimensionnelles des spécimens de Java de ceux découverts en Chine (Dali, Hexian, Zhoukoudian), à l'exception de la modélisation de l'os frontal où nous avons une discrimination possible entre les *Homo erectus* suivant l'axe 2 des spécimens de Java de ceux provenant de Chine. Mais les individus au sein de ces deux groupes (Java, Chine) varient entre eux suivant l'axe 1.

Les différences ne correspondraient alors pas ou peu (Sambungmacan 3) à une particularité insulaire.

Les particularités de Sangiran 17 et Sangiran 10 pourraient être liées à leur âge stratigraphique (inférieur à -0,73 Ma ; SARTONO, 1982). Les différences de conformations tridimensionnelles de Sangiran 2 et Sangiran 38, appartenant à la même formation géologique (Kabuh) et de Trinil 2, considéré par Sartono (1982) comme de la même époque, pourraient refléter la variation inter-spécifique de cette population insulaire pour cette période. En effet, les spécimens plus récents (BARTSTRA *et al.*, 1988 ; SWISHER *et al.*, 1996 ; ANTON *et al.*, 2002 ; WIDIANTO *et al.*, 2003) découverts à Java ont des conformations spatiales de la calotte crânienne plus modernes que celle de Sangiran 17 (réduction de l'angle astérion – lambda – astérion, de la constriction post-orbitaire, accroissement de la largeur bipariétale, contour sagittal plus courbé et plus haut).

Cette différence conformationnelle entre les fossiles de Sangiran et les autres fossiles plus récents découverts à Java pourrait correspondre à une anagenèse graduelle ou quantique due à l'insularité. La similitude tridimensionnelle des *Homo erectus* continentaux correspondrait alors à des apports génétiques suivant les périodes depuis les îles indonésiennes.

Autre hypothèse, les conformations tridimensionnelles plus récentes que celles des spécimens de Sangiran correspondraient à un renouvellement de la population insulaire par migration depuis le continent.

Nous avons constaté une évolution de la conformation tridimensionnelle des *Homo erectus* vers une conformation apomorphe, plus moderne (forte réduction de la constriction post-orbitaire avec un élargissement de l'écaille cérébrale frontale, bombement de la courbure sagittale). Parmi eux, deux spécimens sont proches des conformations des *Homo sapiens* préhistoriques : Dali et Sambungmacan 3 pour la modélisation de la calotte crânienne.

Les analyses tridimensionnelles de Detroit (2000, 2002), portant sur des *Homo erectus* et des *Homo sapiens* préhistoriques et historiques asiatiques ne permettent pas d'évoquer une évolution locale vers l'espèce *Homo sapiens* comme le supposent certains auteurs (HAWKS *et al.*, 2000, 2001 ; WOLPOFF *et al.*, 2000).

La similitude entre ces deux individus et quelques spécimens préhistoriques d'*Homo sapiens* est relative. Si nous ne comparons que les calottes crâniennes ces deux fossiles asiatiques sont proches de Jebel Irhoud 1, mais l'écart avec ce fossile nord-africain sur l'ACP est supérieur à celui avec d'autres *Homo erectus*. L'écart est moindre dans le cas de la modélisation de l'os frontal, mais les deux *Homo erectus* sont tout aussi proches de spécimens Néandertaliens comme Amud 1 et l'Homme de Neandertal.

Suivant ces dernières constatations nous proposons de considérer les *Homo erectus* en deux populations chronologiquement différentes : le groupe Sangiran – Trinil et les autres spécimens fossiles. Nous considérons tous ces individus comme faisant partie d'un seul phylum évoluant par anagenèse graduelle ou quantique.

Le spécimen indien de Narmada présente une modélisation de l'os pariétal droit semblable à celle de Ngandong 6 (os pariétal plus allongé antéro-postérieurement qu'étiré verticalement). Nous proposons de le considérer comme *Homo erectus* et non comme *Homo heidelbergensis* (CAMERON *et al.*, 2004a).

L'analyse tridimensionnelle du crâne de l'enfant de Modjokerto ne nous aurait pas apporté plus d'informations sur ce phylum en raison de son très jeune âge et du non développement des caractères crâniens adultes.

VIII.4.4 Anténéandertaliens et *Homo sapiens*

VIII.4.4.1 *Homo cepranensis*

En raison de leur état fragmentaire important (ARSUAGA *et al.*, 1999), nous n'avons pas inclus dans nos comparaisons les représentants de l'espèce *Homo antecessor*, ceux-ci ne présentant pas tous les points de repères nécessaires à nos modélisations. Du fait de la juvénilité de ces individus, nous n'aurions pu les comparer qu'avec d'autres formes juvéniles d'autres espèces ce que nous n'avons pas fait, en raison d'un effectif juvenile peu important.

Toutes les modélisations de Ceprano 1 (à l'exception de l'os pariétal droit isolé) se sont révélées correspondre tridimensionnellement aux modélisations des Néandertaliens (faible constriction post-orbitaire, stéphanions très externes, largeur bistéphanique semblable à la largeur bisphénique, calotte crânienne plus courte).

Plusieurs hypothèses permettent d'expliquer cette ressemblance tridimensionnelle avec les Néandertaliens adultes.

Ceprano 1 est un fossile fragmentaire qui a été reconstruit (ASCENZI *et al.*, 2000 ; CLARKE, 2000). Les fragments pourraient avoir été mal positionnés, certaines largeurs exagérées ou minorées, ce qui aurait entraîné un positionnement différent des points de repères.

Cette hypothèse ne peut être validée en raison de la continuité bilatérale de l'os frontal et l'os occipital (malgré les fractures). L'état de ces fragments limite les possibilités de positionnement des fragments restants. Parmi eux, l'état de conservation de l'os temporal droit permet de reconstruire l'os gauche fragmentaire. Une fois les os pariétaux en place la longueur maximale de la calotte crânienne est établie avec seulement quelques millimètres de variation possible. Seul le positionnement des fragments des os pariétaux est difficile pour l'établissement de la courbure latérale de la voûte bipariétale. Mais la conservation d'une portion de la suture coronale et de presque toutes les sutures lambdatiques limite de nouveau le champ des possibilités de positionnement. Les discussions relatives aux propositions de reconstruction (ASCENZI *et al.*, 2000 ; CLARKE, 2000) sont limitées au positionnement d'un fragment isolé et non à la validité de la reconstruction. Nous considérons donc les points de repères relevés sur la reconstruction de Ceprano 1 comme valides.

Les Néandertaliens ont une conformation tridimensionnelle très semblable à celle de Ceprano 1. La similitude de conformation mise en évidence par les ACP est systématique. Ceprano 1 a toujours une valeur identique suivant l'un des axes de l'ACP et une valeur extrêmement proche suivant l'autre axe. La similitude est moins marquée lors de la comparaison des os pariétaux droits. Cependant Ceprano 1 est relativement proche de La Ferrassie 1 (tout comme de Ngandong 7, notre proposition d'Arago, Elandsfontein et Pataud).

Comme nous l'avions indiqué, cette similitude tridimensionnelle de la modélisation de l'os pariétal ne tient pas compte des caractères morphologiques surfaciques comme la présence ou non d'un torus angularis. Les Néandertaliens n'ont pas de torus angularis équivalent et non pas d'os pariétaux aussi épais (PATTE, 1955 ; GRIMAUD, 1982b) que ceux de Ceprano 1. Ce dernier a un aspect plus robuste que les spécimens Néandertaliens. Toutefois les sinus frontaux sont déjà développés chez Ceprano 1 (BRUNER *et al.*, 2005) et la constriction post-orbitaire est réduite.

Notre modélisation de la calotte crânienne ne permet pas de mettre en évidence le chignon occipital des Néandertaliens ainsi que la dépression pré-lambdatique. De plus la face

de Ceprano 1 n'a pas été conservée. Une modélisation tenant compte de ces caractères pourrait permettre de discriminer un peu plus ce spécimen.

Nous proposons cependant de considérer un lien phylétique entre Ceprano 1 et les Néandertaliens en nous fondant sur la modélisation de l'os frontal et de la voûte bipariétale ainsi que sur la communauté de certains caractères comme le quasi alignement du porion et du processus zygomatique chez Ceprano 1 comme chez les Néandertaliens. Nos résultats tridimensionnels ne correspondent pas à ceux de l'étude crânio-faciale de Cameron *et al.* (2004a) en soulignant la particularité morphométrique de ce spécimen par rapport à OH 9 et Sangiran 17. Une comparaison en vue supérieure de Ceprano 1 avec Bodo 1 et OH 9 permet de constater l'allongement important de la calotte crânienne de ces deux spécimens par rapport à Ceprano 1 (BRUNER *et al.*, 2005). Alors que la calotte crânienne de Ceprano (torus sus-orbitaire exclu) présente une forme sphénoïde, Bodo 1 a un contour rhomboïde. Nos résultats diffèrent aussi de ceux de l'ACP présentée par Manzi (2004) portant sur une modélisation du profil sagittal de 17 hominidés fossiles dont Ceprano. Ces résultats ne peuvent être comparés, notre étude ayant porté sur des modélisations tridimensionnelles et non en 2-D comme c'est le cas pour Manzi (2004).

Nous préciserons ultérieurement notre proposition, après avoir étudié la position phylétique des *Homo heidelbergensis* vis-à-vis des Néandertaliens, en redéfinissant la notion d'Anténéandertaliens.

VIII.4.4.2 *Homo heidelbergensis* d'Europe et d'Afrique : réhabilitation des *Homo rhodesiensis*

A l'exception de la modélisation de la voûte bipariétale et de l'os pariétal isolé, nous avons pu au cours de l'Analyse en Composantes Principales de chaque modélisation tridimensionnelle discriminer les *Homo heidelbergensis* en deux groupes séparés au minimum suivant l'axe 2 (crâne en 24 points) mais aussi suivant l'axe 1 (calotte crânienne). Nous pouvons chaque fois séparer notre proposition de chimère Arago3D et Sima de los Huesos 5 de Kabwe, Bodo 1 (os frontal) et Petralona.

Lors de l'ACP portant sur les modélisations de la voûte bipariétale les différents *Homo heidelbergensis* constituent un groupe plus continu, avec de faibles écarts suivant les axes 1 et/ou 2. Sale 1 constitue le spécimen le plus archaïque (faible largeur bistéphanique et orientation oblique de la portion latérale de l'écaille pariétale) alors que Petralona et Kabwe diffèrent légèrement suivant l'axe 2 (bosses pariétales plus internes pour Petralona). Notre

proposition Arago3D a une voûte bipariétale plus étirée verticalement que ces trois autres spécimens (valeur supérieure sur l'axe 1). Elandsfontein, Sima de los Huesos 5 et Swanscombe présentent des valeurs supérieures sur l'axe 1 et diffèrent suivant l'axe 2. Swanscombe est nettement différent des autres *Homo heidelbergensis* considérés et présente une conformation spatiale similaire aux Néandertaliens adultes et proche de celle de Ceprano 1. La portion latérale de l'écaille pariétale, anciennement oblique vers l'intérieur antérieurement (avec une faible écaille supérieure), devient verticale puis oblique vers l'extérieur. Ceci caractérise une écaille latérale de plus en plus redressée, traduisant une poussée de l'encéphale.

La modélisation de l'os pariétal isolé accentue les différences entre Sale 1 et Swanscombe. La dispersion des spécimens le long de l'axe 1 est accrue. Les spécimens les plus archaïques sont nord-africain (Sale 1 et Ternifine 4). L'écart entre Kabwe et Petralona est accru suivant l'axe 1, mais cet écart est compensé par l'importance moindre de cet axe sur la variabilité totale (20,5% contre 24,9% pour l'ACP concernant la voûte bipariétale). Les conformations spatiales de Ceprano 1 et de Elandsfontein sont similaires à celle que nous proposons pour le pariétal droit Arago 47. La modélisation du pariétal de Sima de los Huesos 5, plus carrée en vue latérale, ne peut être discriminée de celle des *Homo sapiens* actuels tout comme celles de Petralona, Ceprano 1, Elandsfontein, Arago3D (toutes plus étirées antéropostérieurement) et Swanscombe. Ces modélisations ne peuvent non plus être aisément dissociées des Néandertaliens (surtout Swanscombe avec une bosse pariétale plus proche de la suture sagittale que de la suture pariéto-temporale).

Les ACP concernant les modélisations des os pariétaux sont celles pour lesquelles les modélisations des *Homo heidelbergensis* sont les moins dissociables. Ce sont aussi les analyses pour lesquelles les axes 1 et 2 ont le moins d'importance pour la représentation de la variabilité totale. Cependant nous avons toujours une discrimination de Sima de los Huesos 5 par rapport à Bodo 1, Kabwe et Petralona.

Le poids relatif des axes 1 et 2 dans l'explication de la variance totale est supérieur au cours des autres ACP. Nous constatons au moyen de ces analyses (crâne, calotte crânienne, os frontal) l'existence de deux groupes (suivant les axes 1 et 2), l'un avec Bodo 1, Kabwe et Petralona et l'autre présentant toujours d'importantes similitudes avec les Néandertaliens et Ceprano 1 (Arago3D, Sima de los Huesos 5, Swanscombe).

Les deux groupes d'*Homo heidelbergensis* ont une courbure crânienne sagittale différente. Celle-ci est plus curviligne pour le groupe Arago3D – Sima de los Huesos 5 (sagittum, bregma et métopion plus hauts, longueur glabellae – opisthocranion réduite). Les

stéphanions de Petralona – Kabwe sont plus hauts et plus internes que ceux d’Arago – Sima de los Huesos 5. Les constriction orbitaires de Petralona et Kabwe sont supérieures à celles d’Arago3D – Sima de los Huesos 5 (plus apomorphes) avec des points fronto-temporaux plus internes et des points fronto-malaires temporaux plus externes. Les calottes crâniennes d’Arago3D et de Sima de los Huesos 5 sont plus larges que celles de l’autre groupe. Cependant le prosthion plus postérieur chez Petralona et Kabwe constitue aussi une marque d’apomorphie pour ces spécimens par rapport à Arago et Sima de los Huesos 5.

Différentes hypothèses peuvent permettre de mieux expliquer cette disparité tridimensionnelle entre ces spécimens du Pléistocène moyen ancien et moyen.

L’hypothèse d’une anagenèse permettrait d’expliquer la différence de conformation spatiale des différents spécimens, un groupe dérivant de l’autre. Bodo 1 serait le spécimen chronologiquement le plus ancien (CLARK *et al.*, 1984, 1994) et précéderait Arago 21-47 (YOKOYAMA *et al.*, 1991). Sima de los Huesos 5 (BISCHOFF *et al.*, 1997), Petralona (CHAMLA, 1981-1982 ; HENNIG *et al.*, 1981 ; BONIS *et al.*, 1991 ; GRÜN, 1996) et Kabwe (VRBA, 1982 ; PARTRIDGE, 1982) constitueraient les spécimens les plus récents. La similitude tridimensionnelle entre l’individu le plus ancien et deux des plus récents et leur disparité par rapport aux deux autres fossiles chronologiquement intermédiaires nous paraît ne pas correspondre à une anagenèse mais plutôt à une cladogenèse, le groupe Arago – Sima de los Huesos 5 dérivant de Bodo 1 vers une autre forme. Mais cette hypothèse est remise en cause par les ressemblances entre Ceprano 1 – Arago – Sima de los Huesos 5 - Néandertaliens.

Les ressemblances tridimensionnelles entre Ceprano 1 et Arago3D correspondent bien à des similitudes tridimensionnelles des deux individus. Un biais pourrait être créé par l’utilisation du fragment occipital de Ceprano 1 dans Arago3D. Ceprano n’ayant pas été utilisé pour articuler les fragments Arago21 et Arago47, mais seulement comme source de fragment allochtone articulé alors spécifiquement, les convergences conformationnelles constatées au niveau de la calotte crânienne en 19 points ne sont pas liées à un biais méthodologique. La modélisation de l’os frontal permet aussi de mettre en évidence des similitudes de forme entre Ceprano 1 et Arago3D non liées à la reconstruction.

Lors des comparaisons de notre proposition de reconstruction du crâne Arago3D avec d’autres Hommes fossiles, seuls Ceprano 1 et Sima de los Huesos 5 ont présenté les plus

grandes similitudes de contours sagittaux, frontaux et transversaux. A l'opposé, Kabwe, Bodo 1 et Petralona ont toujours présenté les mêmes dissimilitudes avec Arago. Ces individus présentent entre eux des caractéristiques anatomiques semblables (robustesse, cavités orbitaires, contours sagittaux, frontaux ; RIGHTMIRE, 1998 ; CAMERON *et al.*, 2004a ; MANZI, 2004).

Cette opposition nous paraît être en désaccord avec l'hypothèse d'une variabilité intra-spécifique. Nous serions alors en présence des individus situés aux limites opposées du champ de variabilité. Nous considérons plutôt ces deux groupes comme deux groupes spécifiques et non un groupe polymorphe (RIGHTMIRE, 1998).

Nous proposons, à l'exception de Petralona (pour l'instant, d'autres spécimens pouvant être rajoutés), de considérer comme *Homo heidelbergensis* tout Hominidé du Pléistocène moyen ancien à récent présent en Europe. En parallèle, nous proposons (comme Vialet ; 2005) de considérer les *Homo heidelbergensis* africains comme *Homo rhodesiensis* Woodward 1921 (Kabwe, Bodo 1).

Petralona est un spécimen particulier, présentant une conformation tridimensionnelle semblable à celles de Kabwe et de Bodo 1, mais situé géographiquement en Europe.

Le crâne de Petralona est donc un fossile avec des particularités originales au niveau de la conformation crânienne. Morphologiquement, même si cela pose des problèmes phylétiques, il y a une réelle convergence avec Kabwe (Broken Hill 1) et Bodo 1 (Gilbert *et al.*, 2003). Petralona pourrait être à ce jour soit l'unique représentant d'*Homo rhodesiensis* en Europe, soit le seul *Homo heidelbergensis* avec ses particularités morphologiques. Il s'agirait alors d'une convergence.

D'après nos modélisations tridimensionnelles, nous estimons, avec des méthodes différentes de celles de Vialet (2005), que cet Hominidé ne fait pas partie du phylum qui a donné Arago3D et Sima de los Huesos 5.

Notre étude n'ayant pu être associée à l'étude de fossiles originaux, cette hypothèse restera objet de discussions. Il serait nécessaire de comparer virtuellement d'autres spécimens du Pléistocène découverts en Grèce comme les deux crânes mis au jour à Apidima (COUTSELINIS *et al.*, 1991) afin de préciser si l'anatomie et la conformation de Petralona correspondent à une particularité individuelle ou à un groupe local résultant de mouvements migratoires.

VIII.4.4.3 *Homo heidelbergensis* d'Europe et Néandertaliens : Positions phylétiques d'Arago3D et de Biache-Saint-Vaast 2

Nous avons évoqué dans les précédents paragraphes des similitudes de conformations tridimensionnelles entre les *Homo heidelbergensis* étudiés et les Néandertaliens. Notre proposition d'Arago3D, tout comme Sima de los Huesos 5, sont systématiquement proches des Néandertaliens lors des Analyses en Composantes Principales portant sur les différentes modélisations tridimensionnelles, les similitudes étant moindres dans le cadre des pariétaux. Paradoxalement, la voûte bipariétale de Swanscombe correspond à la conformation spatiale des Néandertaliens.

Nous pourrions extrapoler en nous fondant sur les résultats concernant les autres *Homo heidelbergensis* et proposer que les conformations du crâne et de la calotte crânienne devaient être similaires à celles des Néandertaliens. En effet, Arago3D et Sima de los Huesos 5 relativement proches dans les ACP portant sur les modélisations de la calotte bipariétale, du crâne et de l'os frontal, sont plus distants des Néandertaliens en ce qui concerne les pariétaux (Arago : stéphanions moins écartés, bosses pariétales moins hautes sur une voûte bipariétale plus étirée antéropostérieurement). Qafzeh 9 empêche d'appliquer le raisonnement inverse. En effet, ce spécimen a une modélisation similaire des pariétaux, mais peu être discriminé des Néandertaliens par les ACP portant sur la calotte crânienne ou sur le crâne. Ce paradoxe est explicable par le fait qu'une région osseuse (pariétal isolé) peut être identique entre deux spécimens, mais que les angulations et relations de cette région avec le reste du crâne peuvent être différentes.

Cependant les courbures frontales, sagittales, transversales et la forme des processus mastoïdiens de Swanscombe, semblent correspondre à un précurseur des Néandertaliens (SANTA LUCA, 1978 ; GRIMAUD, 1982b). Nous le considérerons comme un *Homo heidelbergensis*.

Notre proposition de reconstruction du spécimen Biache-Saint-Vaast 2 (BSV 2), quelle que soit la modélisation analysée, a une conformation spatiale correspondant à celles des Néandertaliens, notamment Amud 1. L'écart est légèrement supérieur lors de la comparaison des modélisations crâniennes car celle-ci prend en compte le prosthion. Ce point-ci n'étant que pure spéculation nous ne tiendrons pas compte de cette analyse pour BSV 2. La modélisation de notre proposition est semblable à Amud 1 au cours de chaque analyse à l'exception de la comparaison des os frontaux, celui de BSV 2 correspondant plus à ceux de la Quina H5 et de La Chapelle-aux-Saints ainsi qu'à Sima de los Huesos 5 et Ceprano 1. Par rapport aux Néandertaliens l'os frontal : est moins allongé antéro-postérieurement en vue

supérieure ; a un métopion moins antérieur ; a des stéphanions moins externes ; présente une constriction post-orbitaire plus importante.

Nous avons précédemment commenté les caractères morphologiques relevés sur notre proposition de BSV 2 et mis en évidence les similitudes anatomiques entre cette reconstruction et les Néandertaliens avec cependant quelques différences (face latérale de l'os pariétal verticale, et courbure de l'écaille pariétale plus brusque en vue frontale). En raison de cette proximité tridimensionnelle et de ces différences entre notre proposition et les Néandertaliens, nous proposons de considérer Biache-Saint-Vaast 2 comme l'un des derniers représentants des *Homo heidelbergensis*, tout comme l'autre spécimen contemporain, Biache-Saint-Vaast 1 (VANDERMEERSCH, 1982 ; ROUGIER, 2003).

Les similitudes tridimensionnelles entre BSV 2 et les Néandertaliens ne nous semblent pas être liées à notre méthode de reconstruction. En effet, Krapina 3 n'a été utilisé que comme guide pour pré-positionner les fragments de BSV 2 les uns par rapports aux autres. Des modifications de positionnement (translation, rotation, élévation, réduction ou accroissement de largeurs) ont été nécessaires pour obtenir la proposition définitive. Les seuls points de repères obtenus à partir d'un autre spécimen que BSV 1 ou 2, sont les points jugaux et le prosthion qui ne sont utilisés que dans la modélisation du crâne et que nous avons ignoré pour l'étude tridimensionnelle de notre proposition de BSV 2.

L'étude de notre proposition de reconstruction Arago3D permet de mettre en évidence des similitudes non seulement avec Ceprano 1 (torus angularis, épaisseur des ossements, robustesse générale), avec Sima de los Huesos 5 (profils sagittaux frontaux, prognathisme maxillaire similaire, mais longueur supérieure du crâne) mais aussi quelques similitudes avec notre proposition de Biache-Saint-Vaast 2 (contours transversaux). Toutefois des différences sont constatées au niveau de la morphologie du torus sus-orbitaire (de type III dans la classification de Cunningham, 1908) et de la robustesse des fragments de BSV 2 (faible torus angularis) et de Arago3D.

Cependant les principales valeurs métriques relevées sur notre proposition de reconstruction d'Arago3D rentrent dans le champ de variabilité des Néandertaliens étudiés.

En raison de ces ressemblances tridimensionnelles entre Arago3D et Ceprano 1, mais aussi avec Sima de los Huesos 5, Biache-Saint-Vaast 2 et les Néandertaliens (similitudes plus conformationnelles que morphologiques), nous considérons Arago3D comme un *Homo heidelbergensis* ancien, présentant encore quelques plésiomorphies (lignes temporelles du

pariétal marquées, présence d'un torus angularis sur le pariétal, prognathisme maxillaire marqué, os malaire massif, grand espace inter-orbitaire) mais déjà des autapomorphies néandertaliennes (absence de fosses canines).

Cette antériorité de l'acquisition de la conformation tridimensionnelle du crâne avant l'acquisition des caractères anatomiques va nous servir de support pour une nouvelle proposition du terme Anténéandertalien.

VIII.4.4.4 *Homo sapiens neanderthalensis* ou *Homo neanderthalensis* :
relations avec les *Homo sapiens*

Les Néandertaliens constituent une population homogène au cours de chaque Analyse en Composantes Principales. Il nous est impossible de discriminer tridimensionnellement les spécimens Néandertaliens européens de celui du Moyen-orient (Amud 1).

Les *Homo sapiens* historiques constituent une population homogène, répondant à une loi Normale (Annexe 3), avec une grande variabilité conformationnelle. A l'exception des analyses portant sur la modélisation des os pariétaux, les Néandertaliens adultes n'ont jamais une conformation spatiale crânienne semblable à celle des *Homo sapiens* historiques (différences au niveau des axes 1 et 2). Toutefois les différences conformationnelles sont moindres lors de l'Analyse en Composantes Principales portant sur la modélisation de l'os frontal.

Nous constatons aussi un écart entre les *Homo sapiens* préhistoriques et les Néandertaliens et *Homo heidelbergensis*. Celui-ci est légèrement inférieur à celui entre les populations historiques et les Néandertaliens et *Homo heidelbergensis*. Pour les modélisations du crâne et de la calotte crânienne, les deux spécimens les plus archaïques des *Homo sapiens* préhistoriques sont Skhul 5 et Jebel Irhoud 1. Ceux-ci présentent un prognathisme maxillaire supérieur à celui des individus plus récents ainsi qu'une configuration plus basse de la voûte crânienne. La comparaison des os frontaux permet d'ajouter Zuttiyeh 1.

Ces trois spécimens feraient partie des représentants les plus anciens des *Homo sapiens* (HUBLIN, 1991 ; STRINGER *et al.*, 1989 ; ZEITOUN, 2001). Ils présentent encore des plésiomorphies que n'ont plus les spécimens plus récents : une constriction post-orbitaire marquée, une largeur des arcades orbitaires (largeur entre les points fronto-malaires temporaux) supérieure à la largeur bisphénique, une glabellule et un nasion très antérieurs, une largeur biastérique supérieure à la largeur entre les bosses pariétales et une voûte sagittale moins curviligne (dolichocéphale) et moins haute.

Bien qu'archaïques par rapport aux *Homo sapiens* plus récents, ces individus ne correspondent pas à ceux des Néandertaliens. Ces derniers ont un crâne plus allongé antéro-postérieurement, une voûte sagittale plus basse avec un rayon de courbure supérieur, des porions plus externes (et dans l'axe des processus zygomatique), une largeur biastérique importante (presque la plus grande des largeurs bilatérales) et un prognathisme maxillaire plus important. La constriction post-orbitaire présente les mêmes proportions que celle des plus anciens *Homo sapiens*, mais la largeur minimale de l'écaille frontale est plus postérieure par rapport aux points fronto-malaires temporaux chez les Néandertaliens.

En comparant les conformations tridimensionnelles différentes du crâne et de la calotte crânienne, nous pouvons discriminer ces spécimens archaïques des Néandertaliens.

Cependant l'analyse de la modélisation de l'os frontal isolé ou de la voûte bipariétale ne permet pas une discrimination totale des spécimens néandertaliens et des *Homo sapiens* archaïques. L'utilisation des caractères morphologiques est alors nécessaire (HUBLIN, 1991 ; ZEITOUN, 2001) pour affiner l'attribution phylétique. L'accroissement de la largeur bistéphanique est une apomorphie commune aux *Homo sapiens* et aux Néandertaliens.

Qafzeh 9 est également un *Homo sapiens* d'Israël, mais celui-ci présente une conformation spatiale très moderne de la calotte crânienne (contour sagittal très curviligne, constriction post-orbitaire faible et réduction de la largeur entre les points fronto-malaires temporaux). Les ACP portant sur les modélisations de l'os frontal et des pariétaux ne permettent pas de discriminer cet individu des Néandertaliens. Ce spécimen présente des largeurs bistéphaniques et entre les bosses pariétales presque identiques. Cette similitude des valeurs empêche de bien le dissocier. En effet les Néandertaliens étudiés ont majoritairement une largeur bistéphanique supérieure à la largeur entre les bosses pariétales, conférant à la portion supérieure de la voûte bipariétale un aspect convergeant vers l'arrière. A l'opposée, la totalité des *Homo sapiens* historiques et préhistoriques ont une largeur bistéphanique inférieure à la largeur entre les bosses pariétales.

Ce caractère semble particulier à certains Néandertaliens. Alors que la configuration observée chez les *Homo sapiens* se retrouve dans les espèces précédentes, une largeur bipariétale supérieure à la largeur entre les bosses pariétales pourrait permettre de dire que nous sommes en présence d'un Néandertalien.

Les différences entre les modélisations des calottes crâniennes ou des crânes permettent de rappeler un phénomène précédemment constaté : une similitude

conformationnelle pour des os isolés (pariétal droit) ne sera pas observée au niveau de la calotte crânienne du fait des relations (angles) différentes entre les ossements suivant les espèces.

Les différences de conformations constatées entre les calottes crâniennes à 19 points, 21 points, entre les crânes et entre les os frontaux (à l'exception des individus précédemment cités) permettent de discriminer les deux populations : *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis*.

Notre choix de différencier de manière spécifique les *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis* est concordant avec les résultats de comparaisons tridimensionnelles différentes (HUBLIN *et al.*, 1996 ; HARVATI, 2002, 2003a, 2003b, 2004 ; BRUNER *et al.*, 2003b ; VIALET, 2005 ; GUIPERT *et al.*, sous presse) ainsi qu'avec des comparaisons d'ADN réalisées entre les fossiles néandertaliens et les *Homo sapiens* actuels ou fossiles (KRINGS *et al.*, 1997 ; CARAMELLI *et al.*, 2003 ; SERRE *et al.*, 2004). Nous n'adhérons pas à l'hypothèse de continuité géographique entre les *Homo sapiens* et les Néandertaliens au Moyen-Orient (WOLPOFF *et al.*, 2001).

Alors que la conformation néandertalienne semble avoir commencé à se mettre en place depuis au moins 800 000 à 900 000 ans, la conformation spatiale correspondant au crâne des *Homo sapiens* semble plus récente. Elle a nécessité l'acquisition de nouvelles apomorphies (TRINKAUS, 2003). Nous constatons aussi une différence tridimensionnelle de la conformation en passant des *Homo sapiens* archaïques (Zuttiyeh 1, Jebel Irhoud 1, Skhul 5 et LH18) aux spécimens plus récents (Cro-Magnon, Markina Gora, Obercassel, Chancelade).

S'agit-il d'une anagenèse ou de la variabilité de la population ? Nous pensons que les deux propositions se recoupent. En effet, alors que Qafzeh 9 présente une conformation moderne (prognathisme maxillaire très faible mais avec une face étirée verticalement avec une grande longueur glabell – prosthion, voûte très courbée, faible constriction post-orbitaire et faible largeur des arcades orbitaires, largeur importante entre les bosses pariétales), le crâne de l'Abri Pataud, spécimen chronologiquement plus récent (MOVIUS, 1975) que Qafzeh 9 (VALLADAS *et al.*, 1991 ; YOKOYAMA *et al.*, 1997), est plus archaïque d'aspect (prognathisme supérieur, dolichocrâne, constriction post-orbitaire plus marquée, présence d'un chignon occipital). Cependant Pataud rentre dans la variabilité de la population *Homo sapiens* historique.

Nous considérons Zuttiyeh 1, Jebel Irhoud 1 et Skhul 5 comme des *Homo sapiens* archaïques, résultants d'une première spéciation et dont les descendants se sont légèrement différenciés par anagenèse vers la conformation historique (réduction du prognathisme maxillaire, face de plus en plus étroite par rapport à la calotte crânienne, crâne à tendance brachycéphale).

L'origine phylétique de ces *Homo sapiens* archaïques est ancienne, entre -250 000 et -160 000 ans (Zuttiyeh : ZEITOUN, 2001 ; Herto : CLARK *et al.*, 2003 ; WHITE *et al.*, 2003 ; Kibish : MCDOUGALL *et al.*, 2005). Ce groupe pourrait s'être spécifié à partir des derniers *Homo rhodesiensis* (ROSAS, 2003). Mais nous ne pouvons exclure une origine plus ancienne des *Homo sapiens* archaïque, provenant d'une forme plus archaïque d'*Homo rhodesiensis*, voir à partir d'un *Homo ergaster*.

Concernant la potentielle origine asiatique du phylum des *Homo sapiens*, en l'absence d'individus asiatiques de comparaison, nous nous référons aux travaux tridimensionnels de Detroit (2000, 2002) et anatomiques de Baba *et al.* (2000) privilégient une origine africaine et non asiatique du phylum *Homo sapiens*. Ces travaux n'adhèrent pas à la théorie d'une continuité régionale Thorne *et al.* (1981) et Wolpoff *et al.* (2000).

L'accrétion des espèces néandertaliennes et *Homo sapiens* ont suivi deux processus différents impliquant des modifications structurelles puis anatomiques différentes : crâne allongé avec une voûte basse et large (platycranie), un arrière crâne étiré et présentant de nombreux sinus (HEIM, 1986) pour les Néandertaliens et à tendance brachycéphale, non prognathe, avec une face étroite avançant une voûte bipariétale plus large au niveau des bosses pariétales pour les *Homo sapiens*.

VIII.5 Proposition de nouvelle définition du terme Anténéandertalien

VIII.5.1 Définition originale (H. et M.-A. de LUMLEY, 1985)

Selon H. et M.-A. de Lumley les Anténéandertaliens ont été définis comme « l'ensemble des hommes fossiles qui a vécu en Europe avant l'Homme de Néandertal, entre 1,5 million d'années et 80 000 ans : c'est-à-dire pendant le Pléistocène inférieur et le Pléistocène moyen. Cette définition ne tient pas compte de leur position phylétique.

Ils occupent toute la surface de l'Europe, depuis l'Atlantique jusqu'à la Transcaucasie. Les plus anciens sont essentiellement localisés dans les régions méridionales. »

VII.5.2 Proposition de définition

Nous proposons de considérer comme Anténéandertalien tout homme fossile présentant une conformation tridimensionnelle du crâne ou de la calotte crânienne comparable à celles des Néandertaliens adultes. Ces individus seraient présents en Europe depuis au moins 800 000 / 900 000 ans (Ceprano 1) jusqu'à la fin du Pléistocène moyen (120 000 ans).

A partir de notre étude nous pouvons inclure, dans ce qui serait un phylum, trois espèces : *Homo cepranensis*, *Homo antecessor* et *Homo heidelbergensis* (avec comme représentant dans cette espèce Arago3D).

Cette définition se fonde sur une morphologie tridimensionnelle qui s'établit chronologiquement précocement, mais n'ignore pas les différences anatomiques entre ces espèces (réductions progressives du prognathisme maxillaire, de la constriction post-orbitaire, des torus angularis, accroissement du volume cérébrale, disparition de la fosse canine). Cette définition implique qu'il existe une relation phylétique entre ces espèces avec une anagenèse graduelle vers l'espèce *Homo neanderthalensis* et acquisition progressive des autapomorphies néandertaliennes.

Tridimensionnellement, les conformations des calottes crâniennes de Ceprano 1, Arago3D et des Néandertaliens sont semblables. Cependant, en l'absence de face conservée, la position phylétique de *Homo cepranensis* ne peut être précisée. La position d'*Homo antecessor*, en raison de l'état de conservation fragmentaire des restes publiés à ce jour, ne peut aussi être précisée. Ces deux espèces pourraient être regroupées phylétiquement avec les *Homo heidelbergensis* et considérées comme des formes anciennes de cette espèce. Arago3D (ou 21-47) en constituerait un représentant typique et BSV 2 l'une des formes les plus récentes.

Ainsi, le terme Anténéandertalien resterait une définition chrono-stratigraphique d'espèces fossiles du Pléistocène retrouvées à ce jour en Europe, dans des limites chronologiques à préciser pour la limite inférieure, compte tenu de la rareté des fossiles. Cette limite inférieure est d'au moins 800 000 / 900 000 ans.

Au plan phylétique, une seule espèce fossile, *Homo heidelbergensis* aurait pu occuper l'Europe jusqu'à la fin du Pléistocène et serait à l'origine des Néandertaliens. En limite la plus tardive, Biache-Saint-Vaast 2 constituerait le dernier représentant des *Homo heidelbergensis*.

Nous proposons que cette définition reste dynamique et ne soit pas exclusive géographiquement et temporellement, ouverte aux nouvelles découvertes.

Suivant cette définition nous ne pouvons considérer Petralona comme un Anténéandertalien en raison de sa conformation spatiale semblable à celle des *Homo rhodesiensis*.

Les *Homo georgicus*, de conformation tridimensionnelle différente, ne sont donc pas considérés comme Anténéandertiens.

VIII.6 Propositions de relations phylétiques au sein du genre *Homo*

Nos propositions de relations phylétiques se fondent préférentiellement sur l'architecture tridimensionnelle des Hominidés étudiés (figures 256, 257 et 258), et non sur des comparaisons morphologiques.

KNM-ER 1813 constitue, avec les *Homo habilis*, la première espèce du genre *Homo*. A partir de -1,8 Million d'années, une ou plusieurs espèces se dispersent hors d'Afrique : *Homo georgicus* dans le Caucase, Modjokerto (peut être les premiers *Homo erectus*) en Asie.

La position chronologique des *Homo ergaster* africains est importante dans la compréhension de ces déplacements et de l'émergence de ces différents phylums. Au niveau tridimensionnel, aucune discrimination n'est aisément possible entre les *Homo habilis*, les *Homo ergaster* et les *Homo georgicus*. Il n'y a pas de différenciations conformationnelles significatives. Nous ne pouvons privilégier aucune hypothèse concernant les relations phylétiques entre ces espèces (RIGHTMIRE, 1998 ; VEKUA *et al.*, 2002 ; GABUNIA *et al.*, 2002). Cependant, les deux dernières espèces pourraient avoir évolué depuis les *Homo habilis*, voir, depuis deux groupes distincts, l'un en Afrique et l'autre hors d'Afrique. Cette hypothèse implique que les *Homo habilis* aient commencé à se déplacer hors d'Afrique.

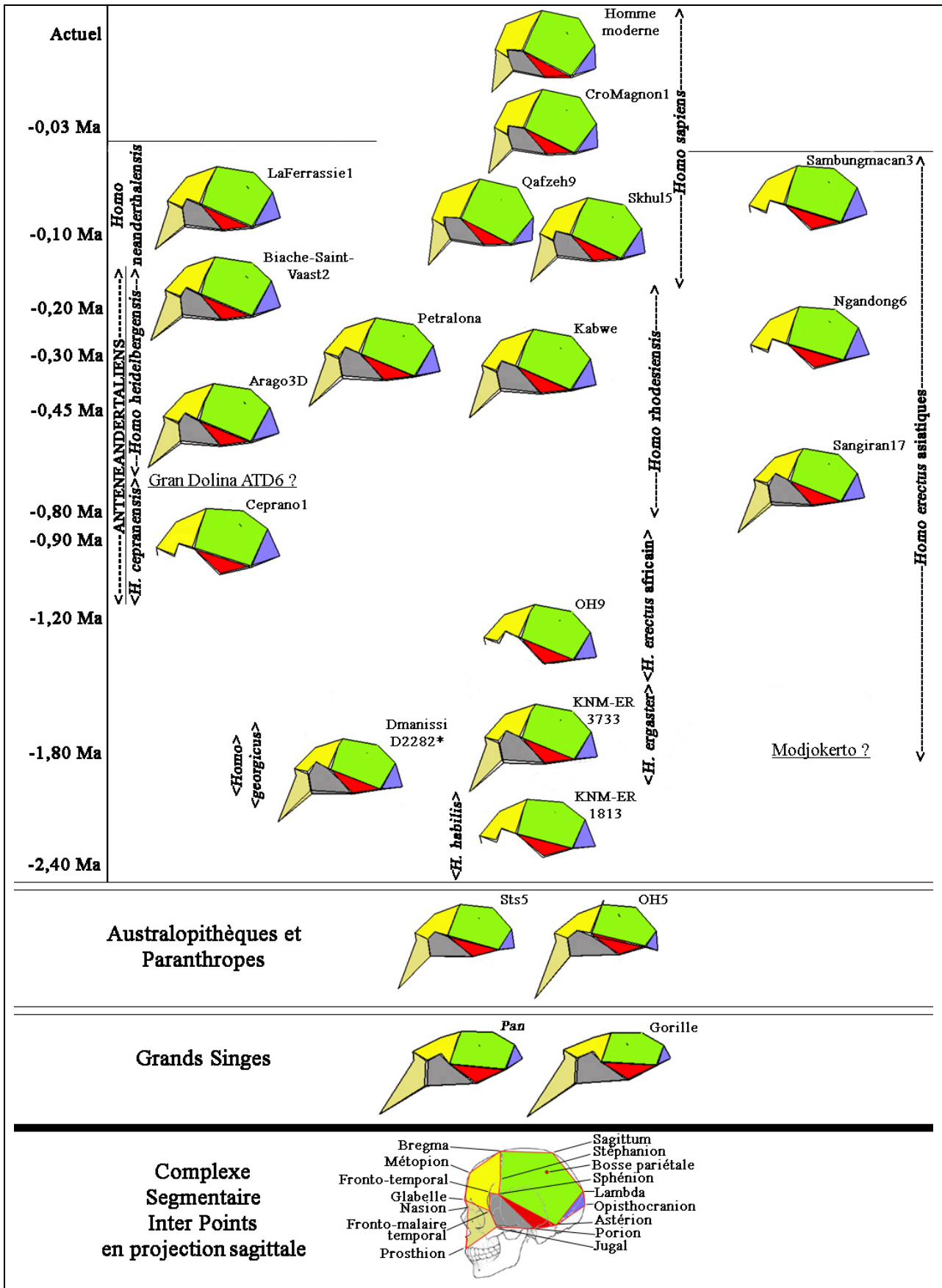


Figure 256 : Evolution des Complexes Segmentaires Inter Points des Hominidés en projection sagittale.

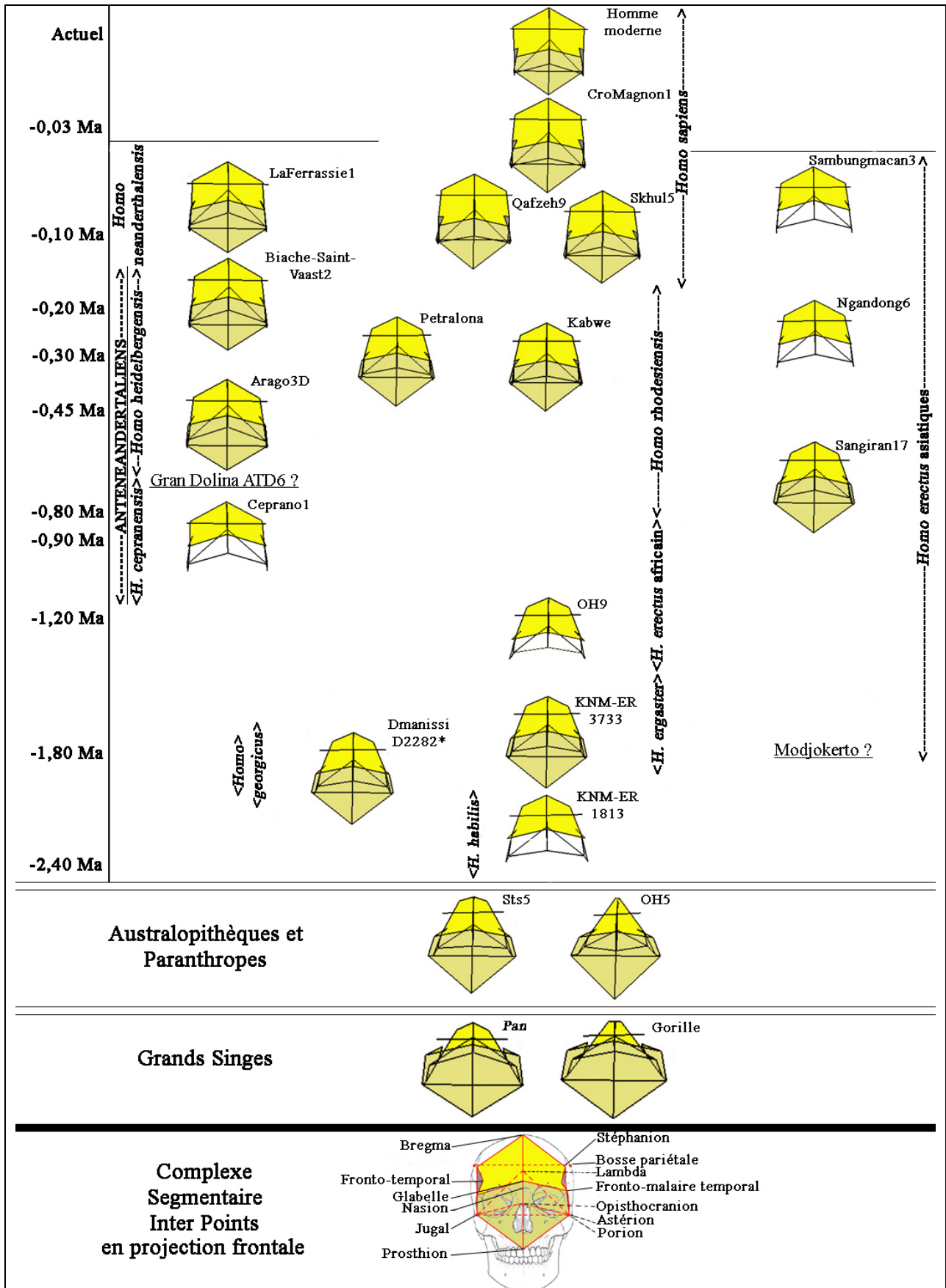


Figure 257 : Evolution des Complexes Segmentaires Inter Points des Hominidés en projection frontale.

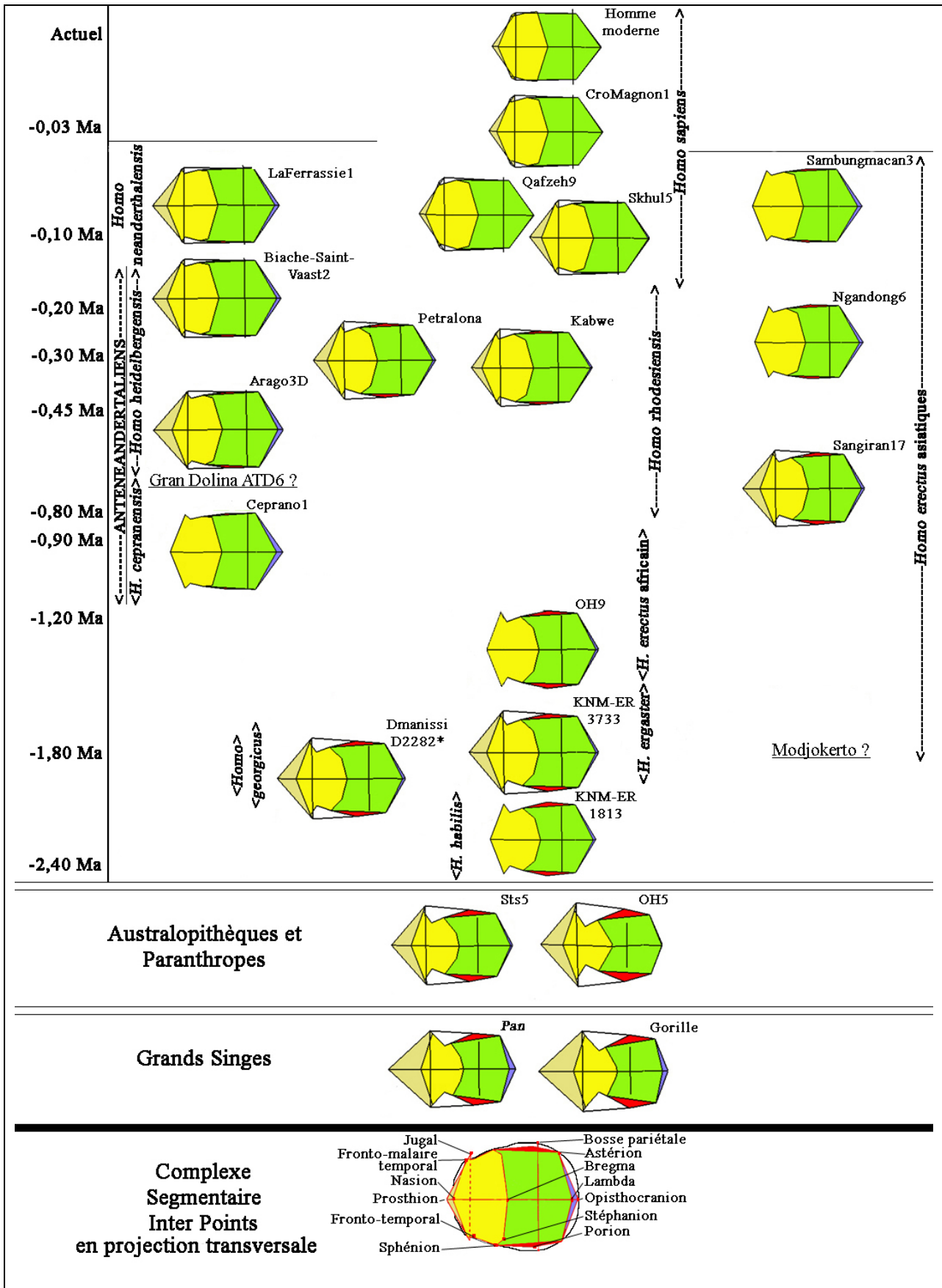


Figure 258 : Evolution des Complexes Segmentaires Inter Points des Hominidés en projection transversale.

En l'absence de modélisation tridimensionnelle de Modjokerto, nous ne pouvons qu'établir des hypothèses concernant l'apparition des *Homo erectus* asiatiques (nous regroupons sous cette appellation tous les fossiles découverts en Asie et attribués aux *Homo erectus*) en précisant que nous distinguons deux conformations tridimensionnelles différentes.

En raison de l'archaïsme tridimensionnel des différents spécimens découverts à Sangiran (notamment Sangiran 17, avec une largeur biporionique supérieure à la largeur maximale de la voûte bipariétale), nous privilégions un peuplement ancien de l'Indonésie (peut-être le même phylum que Modjokerto). Le phylum se serait ensuite soit éteint soit aurait été enrichi génétiquement par de nouveaux individus (Ngandong), soit aurait simplement évolué.

Nous ne différencions pas les *Homo erectus* chinois des fossiles découverts en Indonésie.

Les représentants les plus récents de ce phylum auraient ensuite disparu à la fin du Pléistocène moyen au profit des premiers migrants *Homo sapiens* en Asie. Malgré les conformations tridimensionnelles moins archaïques de Sambungmacan 3 et Dali, nous ne considérons pas le modèle multirégional (WEIDENREICH, 1947 ; THORNE *et al.*, 1981, WOLPOFF *et al.*, 2000) comme un modèle valide. En effet, Sambungmacan 3 et Dali présentent notamment une largeur postérieure de la voûte bipariétale supérieure à la largeur bisphénique, ce qui n'est plus le cas pour les *Homo sapiens* considérés. Nous privilégions, tout comme Baba *et al.* (2000) et Détroit (2000, 2002), que les *Homo sapiens* asiatiques correspondent à une nouvelle vague de migration.

Les *Homo rhodesiensis* succèdent aux *Homo ergaster* en Afrique (Bodo 1 ; CLARK *et al.*, 1984, 1994) il y a moins d'un million d'années.

Nous privilégions une anagenèse en raison des faibles différences tridimensionnelles entre les deux espèces : accroissement de la largeur bisphénique, largeur de la voûte bipariétale supérieure ou égale à la largeur biporionique, réduction du prognathisme maxillaire, accroissement du volume cérébral (CAMERON *et al.*, 2004a).

En l'absence d'autres sources plus anciennes, nous privilégions qu'une nouvelle accréation spécifique ait eu lieu aux environs de -250 000/200 000 ans (ZEITOUN, 2001) avec l'apparition des premiers *Homo sapiens* archaïques au Moyen-Orient (Zuttiyeh 1) ou en Afrique (Herto, Kibish). Ceux-ci se seraient alors répandus en Afrique du Nord (Jebel Irhoud 1 ; HUBLIN, 1991), en Afrique de l'Est (CLARK *et al.*, 2003) et au Moyen-Orient (Skhul 5 ;

STINGER *et al.*, 1989 ; Qafzeh 9 ; VALLADAS *et al.*, 1991 ; YOKOYAMA *et al.*, 1997). Ces *Homo sapiens* présentent un prognathisme maxillaire moindre que celui des *Homo rhodesiensis* ainsi qu'un élargissement de la face supérieure (os frontal) par rapport au reste du neurocrâne (accroissement de la largeur bistéphanique et métopion plus antérieur). Malgré les ressemblances conformationnelles entre les *Homo rhodesiensis*, tel que Kabwe, et les *Homo sapiens*, nous n'excluons pas la possibilité d'une origine plus ancienne de l'espèce *Homo sapiens*.

Nous constatons que les *Homo sapiens* qui se dispersent ensuite en Europe (pas de spécimens de comparaison pour l'Asie) diffèrent légèrement tridimensionnellement de ces premiers *Homo sapiens* archaïques (réduction du prognathisme maxillaire et de la constriction post-orbitaire, tendance vers la brachycéphalie). Il s'agit peut être du résultat d'une courte anagenèse.

En Europe, les *Homo sapiens* succèdent aux Néandertaliens (Pestera cu Oase, Roumanie ; TRINKAUS *et al.*, 2003). Nous ne discuterons pas du processus de disparition de ces derniers vers -34 000 ans (MERCIER *et al.*, 1991). Malgré la découverte de fossiles particuliers (DUARTE *et al.*, 1999) les Néandertaliens ne nous semblent pas s'être métissés avec les *Homo sapiens* (KRINGS *et al.*, 1997 ; CARAMELLI *et al.*, 2003 ; SERRE *et al.*, 2004). Les différences tridimensionnelles sont très nombreuses : prognathisme maxillaire des Néandertaliens plus important, largeur postérieure de la voûte bipariétale supérieure à la largeur bisphénique, opisthocranion plus postérieur et éloigné du lambda. A cela viennent s'ajouter de nombreuses différences morphologiques (PATTE, 1955 ; HEIM, 1986 ; CONDEMI, 2003 ; GUIPERT *et al.*, sous presse).

Afin d'expliquer la position phylétique des Anténéandertaliens successifs et l'accrétion du phylum néandertalien, nous proposons trois modèles différents :

VIII.6.1 Modèle d'accrétion ancienne des Néandertaliens

Les *Homo georgicus* sont considérés suivant ce modèle comme étant les premiers Anténéandertaliens. Leurs descendants se seraient répandus depuis le Caucase vers l'Europe jusqu'à l'Atlantique. Cette population européenne serait alors restée isolée. Au cours de cet isolement, l'apparition de la morphologie tridimensionnelle de la calotte crânienne semblable à celles des Néandertaliens s'effectue en premier. Les caractères anatomiques (taille et forme des processus mastoïdiens, courbure de l'écaille pariétale, chignon occipital de type

néandertalien, réduction de la fosse canine, contour des cavités orbitaires, accroissement du volume cérébral) se mettent progressivement en place avec une gracilisation générale des individus par rapport à Ceprano 1 et aux premiers *Homo heidelbergensis* (Arago3D). Le stade néandertalien constitue alors la phase ultime de la spéciation.

Cependant ce modèle souffre de lacunes chronologiques et fossiles. L'absence de fossiles humains entre Dmanissi et Ceprano ne permet pas de préciser le mode de mise en place de la conformation spatiale néandertalienne.

En ce fondant sur ce modèle d'accrétion ancienne, l'existence phylétique des espèces *Homo cepranensis* et *Homo antecessor* peut être remise en cause. Ce modèle implique une évolution conformationnelle progressive entre les spécimens. Il est alors possible de considérer ces spécimens comme des sous-espèces ou des formes archaïques des *Homo heidelbergensis*.

Suivant ce modèle, la conformation spatiale différente de Petralona correspondrait à un mouvement migratoire de spécimens d'*Homo rhodesiensis* depuis l'Afrique vers l'Europe (sans ignorer une possible convergence). En raison d'une origine ancienne de la population européenne, ce mouvement migratoire symbolisé par Petralona n'impliquerait aucun échange génétique entre les *Homo heidelbergensis* et les *Homo rhodesiensis*.

Le développement des Anténéandertaliens correspondrait à un développement de type insulaire sans apport génétique externe, avec une population autarcique depuis l'apparition de ses premiers représentants jusqu'à la disparition des Néandertaliens.

Nous ne privilégions pas ce modèle.

VIII.6.2 Modèle d'accrétion récente des Néandertaliens

Ce modèle est en adéquation avec celui présenté par Bar-Yosef et Belfer-Cohen (2001).

Dmanissi constitue la première vague d'expansion en direction de l'Europe, mais sans pérennisation d'un peuplement en Europe même. D'autres mouvements de population via l'Afrique du Nord (Gibraltar, Sicile) seraient responsables des traces d'occupations relevées sur le pourtour méditerranéen.

Ceci explique la rupture chronologique entre Dmanissi et les premiers sites espagnols (Fuente Nueva-3 et Barranco León) et français (Le Vallonet) sans préciser si il s'agit d'un ou de plusieurs mouvements migratoires. L'absence de restes humains dans ces sites nous

empêche de préciser si *Homo cepranensis* fait partie de ces populations ou s'il s'agit d'un nouvel apport. Bruner *et al.* (2005) estiment que cette espèce constituerait phénotypiquement la première forme à partir desquels les Hominidés du Pléistocène moyen auraient évolué. Selon Cameron *et al.* (2004a), contrairement à Mallegni *et al.* (2003) il ne s'agirait pas d'une nouvelle espèce mais d'une forme d'*Homo ergaster/Homo erectus* différente des Anténéandertaliens ou Prénéandertaliens.

Ces premiers européens occidentaux auraient ensuite été remplacés ou supplantés par d'autres Hominidés provenant d'Afrique ou du Moyen-Orient. Les fossiles de la Gran Dolina à Atapuerca (ATD6) correspondraient à cette nouvelle migration. La position phylétique de ces *Homo antecessor* et *Homo cepranensis* peut aussi faire l'objet de discussions, entre ancêtre des *Homo heidelbergensis*, ou phylum remplacé par une migration d'Afrique ou du Moyen-Orient.

Entre -700 000 et -500 000 ans, selon Bar-Yosef et Belfer-Cohen (2001), une population stable et durable s'installe en Europe. Il s'agit des *Homo heidelbergensis*. Du fait d'une origine récente de cette population, de nouveaux spécimens d'Afrique auraient pu jouer un rôle génétique et enrichir la population européenne. Cette hypothèse est plus adaptée pour expliquer le polymorphisme des *Homo heidelbergensis* (RIGHTMIRE, 1998). La différenciation des *Homo rhodesiensis* et des *Homo heidelbergensis* ne s'établit alors plus que suivant un aspect géographique.

L'apparition des *Homo sapiens* et des *Homo neanderthalensis* correspondrait alors à deux spéciations distinctes, en des lieux différents, débutant au Pléistocène moyen récent.

Cette hypothèse implique des mouvements migratoires fréquents avec renouvellement des populations présentes en Europe. Ceci permet d'expliquer la succession des espèces européennes ainsi que la présence d'individus (Petalona) présentant une conformation tridimensionnelle différente de celle de leurs contemporains géographiques. Cependant cette hypothèse ne permet pas d'expliquer les similitudes de conformation tridimensionnelles en Europe depuis le stade final du Pléistocène inférieur (calotte crânienne de Ceprano) ainsi que les différences de conformations entre les *Homo heidelbergensis* et les *Homo rhodesiensis*.

Dans le cadre de ce modèle seule la définition non phylétique de 1985 concernant les Anténéandertaliens (LUMLEY *et al.*) doit être retenue.

Des trois hypothèses présentées, celle-ci est celle à laquelle nous adhérons le moins.

VIII.6.3 Modèle d'accrétion intermédiaire des Néandertaliens (figure 259)

Ce modèle est appelé intermédiaire car nous considérons que la population anténéandertalienne est présente en Europe au minimum depuis le Pléistocène inférieur final.

En l'absence de continuité chronologique entre les sites Européens depuis Dmanissi jusqu'à Fuente Nueva 3 et Barranco León (OMS *et al.*, 2000), ainsi qu'en raison des différences conformationnelles (prognathisme maxillaire, faible largeur de la face frontale et profil sagittal moins curviligne) et anatomiques (profil crânien différent dans le plan frontal), nous ne considérons pas phylétiquement les *Homo georgicus* comme origine directe des Anténéandertaliens. Cette proposition serait réétudiée si des fossiles chronologiquement intermédiaires venaient à être découverts

Les premiers européens occidentaux se sont installés sur le pourtour méditerranéen, peut-être après être passés par le Caucase ou le Bosphore, ou éventuellement via Gibraltar, ou la Sicile. Nous ne savons cependant pas si il s'agissait des représentants de l'espèce *Homo ergaster*, voir d'*Homo habilis*, qui auraient ensuite évolué vers les Anténéandertaliens, ou d'Anténéandertaliens apparus en Afrique et ayant migré vers l'Europe et disparu en Afrique.

Les Anténéandertaliens évoluent lentement en Europe vers la conformation néandertalienne typique et développent les caractères anatomiques propres aux Néandertaliens : réduction de la fosse canine avec Arago 21-47, arrondissement progressif des cavités orbitaires, gracilisation de la morphologie, développement des sinus crâniens afin d'alléger le crâne allongé, alignement du porion avec le processus zygomatique et chignon occipital avec Biache-Saint-Vaast 2, réduction limitée du prognathisme maxillaire.

Cette spéciation européenne implique de considérer Petralona comme un *Homo rhodesiensis* en raison de sa conformation tridimensionnelle différente (sans exclure la possibilité d'une convergence anatomique). Ce mouvement migratoire n'implique aucun apport génétique en raison d'une accrétion ancienne des Anténéandertaliens par rapport aux *Homo rhodesiensis*.

Ce troisième modèle d'accrétion est celui que nous privilégions (figure 259). Ce modèle est une proposition d'interprétation phylétique de l'évolution des Hominidés durant la période du Pléistocène ancien inférieur jusqu'à l'Holocène et est susceptible d'évoluer en fonction des futures découvertes. Il est basé sur les restes fossiles découverts et auxquels nous avons eu accès. Il n'est pas clos et est susceptible d'être modifié en fonction des découvertes.

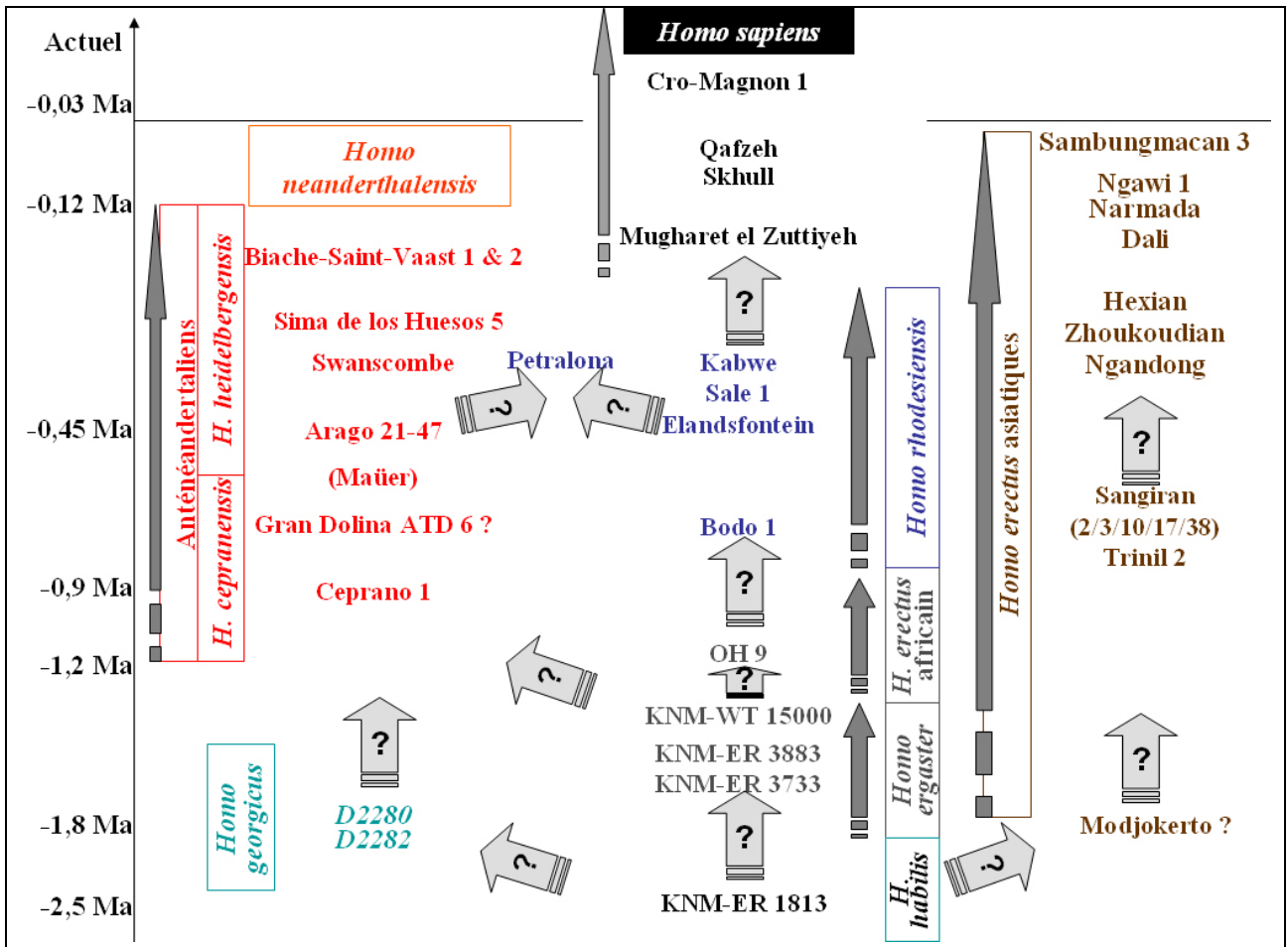


Figure 259 : Proposition de relations phylétiques fondée sur la chronologie, la localisation géographique et la conformation tridimensionnelle des individus du genre *Homo*, du Pléistocène ancien inférieur jusqu'à l'Holocène.

Conclusion et Perspectives

Après examen des fragments fossiles conservés, nous avons proposé, pour Arago 21-47 et Biache-Saint-Vaast 2, deux reconstructions tridimensionnelles virtuelles. Celles-ci ont nécessité différentes opérations numériques, réalisées sur les modélisations volumiques et surfaciques des fragments scannés par rayonnement X. Après modélisation, découpage, symétrisation et collage de ces fragments, nous avons prélevé puis joint virtuellement des ossements allochtones.

Une nouvelle reconstruction pour le crâne Arago 21-47 est proposée (Arago3D). Cette proposition de reconstruction présente une voûte crânienne plus basse, aussi allongée, mais plus large. Cette reconstruction peut être rapprochée morphologiquement du crâne de Ceprano 1.

La première proposition de reconstruction numérique de Biache-Saint-Vaast 2 a permis de positionner virtuellement les fragments fossiles les uns par rapport aux autres. Nous avons constaté la proximité morphologique entre notre proposition de Biache-Saint-Vaast 2 et les crânes de Néandertaliens (notamment Amud 1 et Krapina 3). Nous relevons aussi des ressemblances anatomiques entre nos deux propositions de reconstructions crâniennes.

Après comparaison morphologique virtuelle de ces deux chimères, nous avons comparé tridimensionnellement ces deux spécimens au moyen de Modélisations Segmentaires Inter Points via des superimpositions Procrustes et des comparaisons par Thin-Plates Splines (TPS). Les conformations tridimensionnelles ont été discriminées au moyen d'Analyses en Composantes Principales réalisées pour chaque portion crânienne modélisée.

Les différences conformationnelles entre les Hominidés étudiés ont été comparées par analyses tridimensionnelles. Nos propositions phylétiques diffèrent de celles proposées notamment par Rightmire (1998), Gilbert *et al.* (2003) et Cameron *et al.* (2004a), en raison de l'utilisation privilégiée de ce type d'analyse plutôt que des comparaisons morphologiques.

L'utilisation des superimpositions Procrustes et des comparaisons TPS nous a permis de mettre en évidence des différences conformationnelles tridimensionnelles crâniennes entre Hominidés du Pléistocène moyen. Le polymorphisme (mosaïque de caractères) des *Homo heidelbergensis* (Rightmire, 1998) correspond vraisemblablement à la concomitance de deux groupes tridimensionnellement distincts. Après recoupement des résultats Procrustes et des

comparaisons morphologiques entre nos propositions d'Arago3D et de Biache-Saint-Vaast 2 avec différents *Homo heidelbergensis*, nous considérons que cette appellation regroupe deux espèces distinctes : les *Homo heidelbergensis* Schoetensack, 1908 (en Europe) et les *Homo rhodesiensis* Woodward, 1921, en Afrique. Cependant, les *Homo rhodesiensis* ne semblent pas limités géographiquement à l'Afrique. Nous supposons que Petralona constitue le témoin d'une vague d'expansion de cette espèce jusqu'en Europe, sans toutefois exclure la possibilité de convergence conformationnelle de cet individu avec les *Homo rhodesiensis*.

Nous avons également mis en évidence une similitude conformationnelle concernant les Hominidés d'Europe depuis le Pléistocène inférieur final jusqu'au Pléistocène supérieur (Ceprano 1 aux Néandertaliens). Nous proposons de modifier la définition chronologique du terme Anténéandertalien en une définition phylétique et de considérer sous cette appellation tous les *Homo heidelbergensis* d'Europe. Nous proposons de rapprocher les *Homo cepranensis* de cette espèce.

Une nouvelle hypothèse concernant la phylogénie européenne est suggérée en considérant Ceprano 1 comme l'un des premiers représentants d'un phylum conduisant, après développement de certains caractères anatomiques, au stade Néandertalien.

Nos chimères d'Arago3D et de Biache-Saint-Vaast 2 s'intègrent parfaitement dans ce modèle d'accrétion des Néandertaliens.

Le terme Anténéandertalien constitue un outil phylétique qui pourra évoluer en fonction des nouvelles découvertes.

Aucun modèle précis n'est suggéré pour l'émergence du genre *Homo* en raison d'un nombre limité de fossiles du début du Pléistocène, mais nous avons mis en évidence des affinités entre les *Homo habilis*, *Homo ergaster* et *Homo georgicus*. Nous n'incluons pas les deux spécimens fossiles de Dmanissi (D2280 et D2282*) dans la lignée anténéandertalienne en raison d'une conformation tridimensionnelle différente. Cependant, il ressort de ces comparaisons que ces deux fossiles correspondent à l'une des premières espèces du genre *Homo* et qu'ils ont dû jouer un rôle important dans la diversité du genre *Homo* au Pléistocène moyen.

A partir des modélisations réalisées, il a été procédé à la discrimination des différentes espèces étudiées en nous fondant sur des conformations spatiales spécifiques.

L'utilisation de ces techniques virtuelles innovantes apporte un nouvel éclairage sur la phylogénie des Hominidés européens et sur les processus d'accrétion de l'espèce néandertalienne.

Les résultats de ce travail d'analyses tridimensionnelles, complémentaires de ceux correspondant à des analyses morphologiques, nous amènent à réfléchir à l'ordre de mise en place des caractères anatomiques et de la conformation tridimensionnelle au cours de l'Evolution humaine.

Nous préférons privilégier la prépondérance de la mise en place de la conformation tridimensionnelle sur celle des caractères anatomiques. Nous essaierons de développer ces idées dans des travaux ultérieurs.

Perspectives

Cette étude présente des limites dont nous avons pleinement conscience.

Tous les fossiles découverts en Europe pour le Pléistocène et dans d'autres régions n'ont pu être analysés à partir des fossiles originaux ou d'images scanners qui n'étaient pas disponibles. Il sera nécessaire de réaliser une scanothèque la plus générale et la plus exhaustive possible des crânes fossiles de toutes les espèces (Dmanissi D2700 et D3444, Ceprano, Saccopastore 1).

Les reconstructions des crânes Arago3D, Biache-Saint-Vaast 2 et Dmanissi D2282* restent des hypothèses de travail.

Cependant les résultats obtenus, en particulier ceux de morphométrie tridimensionnelle montrent l'intérêt majeur de cette approche méthodologique pour l'étude de l'Evolution humaine. Nous espérons pouvoir confronter ces travaux avec d'autres équipes scientifiques.

Bien d'autres travaux restent à effectuer.

Les reconstructions virtuelles des fossiles déformés ou fragmentaires pourront être réalisées.

D'autres méthodes d'analyses morphométriques pourront être développées, en particulier par la mise au point de méthodes d'études matricielles tridimensionnelles et plus particulièrement volumétriques et surfaciques, plus performantes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ALEMSEGED, Z., COPPENS, Y., GERAADS, D. (2002) : Hominid Cranium From Omo: Description and Taxonomy of Omo-323-1976-896. *American Journal of Physical Anthropology*, **117**:108-112.
2. ANTON, S. C., MARQUEZ, S., MOWBRAY, K. (2002) : Sambungmacan 3 and cranial variation in Asian *Homo erectus*. *Journal of Human Evolution*, **43** : 555-562.
3. ARAMBOURG C, HOFFSTETTER, R. (1955) : Le gisement de Ternifine : Résultats des fouilles de 1955 et découvertes de nouveaux restes d'Atlanthropus. *C.r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris*, **241** : 431-433.
4. ARSUAGA, J.-L., MARTINEZ, I., GRACIA, A., CARRETERO, J.-M., CARBONELL, E. (1993) : Three new human skulls from the Sima de los Huesos Middle Pleistocene site in Sierra de Atapuerca. *Nature*, **362** :534-537.
5. ARSUAGA, J. L., MARTINEZ, I., GRACIA, A., CARRETERO, J. M., LORENZO, C., GARCIA, N. (1997a) : Sima de los Huesos (Sierra de Atapuerca, Spain). The site. *Journal of Human Evolution*, **33**(2-3) : 109-127.
6. ARSUAGA, J. L., MARTINEZ, I., GRACIA, A., LORENZO, C. (1997b) : The Sima de los Huesos crania (Sierra de Atapuerca, Spain). A comparative study. *Journal of Human Evolution*, **33**(2-3) : 219 - 281.
7. ARSUAGA, J. L., MARTINEZ, I., LORENZO, C., GRACIA, A. (1999) : The human cranial remains from Gran Dolina Lower Pleistocene site (Sierra de Atapuerca, Spain). *Journal of Human Evolution*, **37** : 431 - 457.
8. ASCENZI, A. (1982). Comparaison entre l'Homme de Tautavel, les Anténéandertaliens d'Italie et l'Homme de Saccopastore. In *1er Congrès international de Paléontologie Humaine. L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles*, ed. CNRS. Nice, 1982, pp. 918-933.
9. ASCENZI, A., MARCHETTI, A. M., MICHELI, M. (1986) : Comparaison entre l'Homme de Tautavel, les Anténéandertaliens d'Italie et l'Homme de Saccopastore. *L'Anthropologie*, **90** : 515-537.
10. ASCENZI, A., BIDDITTU, I., CASSOLI, P.F., SEGRE, A.G., SEGRE-NALDINI, E. (1996): A calvarium of late *Homo erectus* from Ceprano, Italy. *Journal of Human Evolution*, **31** : 409-423.
11. ASCENZI, A., MALLEGGNI, F., MANZI, G., SEGRE, A.G., SEGRE-NALDINI, E. (2000) : A re-appraisal of Ceprano calvaria affinities with *Homo erectus*, after the new reconstruction. *Journal of Human Evolution*, **39** : 443-450.
12. AUGUSTE, P. (1990) : *Contribution à l'étude des grands Mammifères du site pléistocène moyen de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais, France) - Etudes*

paléontologiques, taphonomiques et paléthnologiques du niveau II base. Diplôme d'Etudes Approfondies, Muséum National d'Histoire Naturelle. Unpublished.

13. BAATEN, P. J. J., HADDAD, M. ABI-NADER, K., ABI-GHOSN, A., AL-KUTOUBI, A., JURJUS, A. R. (2003) : Incidence of Metopism in the Lebanese Population. *Clinical Anatomy*, **16** : 148-153.
14. BABA, H., AZIZ, F., NARASAKI, S. (2000) : Restoration of the Face of Javanese *Homo erectus* Sangiran 17 and Re-evaluation of Regional Continuity in Australasia. *Acta Anthropologica Sinica*, **19 suppl** : 34-40.
15. BABA, H., AZIZ, F., KAIFU, Y., SUWA, G., KONO, R. T., JACOB, T. (2003) : *Homo erectus* Calvarium from the Pleistocene of Java. *Science*, **299** : 1384-1388.
16. BALZEAU, A., GRIMAUD-HERVE, D., JACOB, T. (2005) : Internal cranial features of the Mojokerto child fossil (East Java, Indonesia). *Journal of Human Evolution*, **48** : 535-553.
17. BARTSTRA, G. J., SOEGONDHO, S., WIJK, van der (1988) : Ngandong man: age and artefacts. *Journal of Human Evolution*, **17** : 325-337.
18. BAR-YOSEF, O., BELFER-COHEN, A. (2001) : From Africa to Eurasia. *Quaternary International*, **75**(1) : 19-28.
19. BERGER, L. R., LACRUZ, R., RUITER, D. J. de (2002) : Revised Age Estimates of Australopithecus-Bearing Deposits at Sterkfontein, South Africa. *American Journal of Physical Anthropology*, **119** : 192-197.
20. BILLY, G. (1975) : Etude Anthropologique des Restes Humains de l'Abri Pataud. *American School of Prehistoric Research Peabody Museum Harvard University Bulletin*, **30** : 201-261.
21. BISCHOFF, J. L., FITZPATRICK, J. A., LEON, L., ARSUAGA, J. L., FALGUERES, C., BAHAIN, J. J., BULLEN, T. (1997) : Geology and preliminary dating of the hominid-bearing sedimentary fill of the Sima de los Huesos Chamber, Cueva Mayor of the Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain. *Journal of Human Evolution*, **33**(2-3) : 129-154.
22. BONIS, L. de, MELENTIS, J. (1991) : Age et position phylétique du crâne de Petralona. In C.T.H.S. (ed.): Les Premiers Européens. Actes du 114e Congrès National des Sociétés Savantes. Paris, pp. 285-289.
23. BONNET, R. (1914): Die ersten vollständigen Skelette der Diluvialmenschen der Renntierzeit aus Deutschland, gefunden bei Oberkassel. *Jber. Rhein. Ges. Wiss. Forsch*, 28-41.
24. BOOKSTEIN, F.L. (1989) : Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE trans. Pattern Analysis Machine Intelligence*. **11**, 567-585.
25. BOOKSTEIN, F. L. (1991) : Morphometric tools for landmark data. Geometry and biology. Cambridge University Press, Cambridge.

26. BOOKSTEIN, F. L. (1996): Combining the tools of geometric morphometrics. In L. F. MARCUS *et al.* (eds.): *Advances in Morphometrics*. New York: Plenum Press, pp. 131-151.
27. BOOKSTEIN, F. L. (1997a) : Shape and the Information in Medical Images: A Decade of the Morphometric Synthesis. *Computer Vision and Image Understanding*, **66** (2) : 97 - 118.
28. BOOKSTEIN, F. L. (1997b) : Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, **1** (3) : 225 - 243.
29. BOOKSTEIN, F., SCHÄFER, K., PROSSINGER, H., SEIDLER, H., FIEDER, M., STRINGER, C., WEBER, G. W., ARSUAGA, J-L., SLICE, D. E., ROHLF, F. J., RECHEIS, W., MARIAM, A. J., MARCUS, L. F. (1999) : Comparing Frontal Cranial Profiles in Archaic and Modern *Homo* by Morphometric Analysis. *The Anatomical Record (New Anat.)*, **257** : 217 - 224.
30. BOOKSTEIN, F. L., GUNZ, P., MITTEROECKER, P., PROSSINGER, H., SCHAEFER, K., SEIDLER, H. (2003) : Cranial integration in *Homo*: singular warps analysis of the midsagittal plane in ontogeny and evolution. *Journal of Human Evolution*, **44** : 167-187.
31. BOULE, M. (1908) : L'Homme fossile de La Chapelle-aux-Saints (Corrèze). *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, **147** : 1349-1352.
32. BOULE, M., VALLOIS, H. V. (1952) : Les hommes fossiles. *Eléments de Paléontologie Humaine*, 4^{ème} édition. Paris.
33. BRÄUER, G., RIMBACH, K. W. (1990) : Late archaic and modern *Homo sapiens* from Europe, Africa, and Southwest Asia : craniometric comparisons and phylogenetic implications. *Journal of Human Evolution*, **19** : 789-807.
34. BRÄUER, G., GRODEN, C., DELLING, G., KUPCZIK, K., MBUA, E., SCHULTZ, M. (2003) : Pathological Alterations in the Archaic *Homo sapiens* Cranium From Eliye Springs, Kenya. *American Journal of Physical Anthropology*, **120** : 200-204.
35. BRAUN, M., BOUCHET, P., HUBLIN, J.-J., MALLET, J.-L. (1999) : Les reconstitutions virtuelles des hommes préhistoriques. *Dossier Pour la Science. Les origines de l'Humanité*, **22** : 78-81.
36. BROADFIELD, D. C., HOLLOWAY, R. L., MOWBRAY, K., SILVERS, A., YUAN, M. S., MARQUEZ, S. (2001) : Endocast of Sambungmacan 3 (Sm3): A New *Homo erectus* From Indonesia. *The Anatomical Record*, **262** : 369-379.
37. BROOM, R. (1947) : Discovery of a new skull of the South African ape-man, *Plesianthropus*. *Nature*, **159** : 672.
38. BROWN, F., HARRIS, J., LEAKEY, R., WALKER, A. (1985) : Early *Homo erectus* skeleton from west Lake Turkana, Kenya. *Nature*, **316** : 788-792.

39. BROWN, F., WALKER, A., WARD, C. V., LEAKEY, R. E. (1993) : New *Australopithecus boisei* calvaria from East Lake Turkana, Kenya. *American Journal of Physical Anthropology*, **91**(2) : 137-159.
40. BROWN, P., SUTIKNA, T., MORWOOD, M. J., SOEJONO, R. P., JATMIKO, SAPTOMO, E. W., DUE, R. A. (2004) : A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. *Nature*, **431** : 1055-1061.
41. BRUNER, E. (2003): Modelli per l'Evoluzione. *Sapere*, **5** : 49-56.
42. BRUNER, E. (2004) : Models for Natural History. *Journal of Anthropological Sciences*, **82** : 11-18.
43. BRUNER, E., MANZI, G., PASSARELLO, P. (2002a) : The "Virtual" Endocast of Saccopastore 1. General Morphology and Preliminary Comparisons by Geometric Morphometrics. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 17-24.
44. BRUNER, E., RICCI, F., MANZI, G. (2002b) : Faces from the ancient Fezzan: a geometric morphometric approach. In LERNIA, S. di, MANZI, G. (ed.) : Sand, stones, and bones. The archaeology of death in the Wadi Tanezzuft valley. Firenze: All'Insegna del Giglio, pp. 251-260.
45. BRUNER, E., MANZI, G. (2003a) : Towards a re-appraisal of the Early Neolithic skeleton from Lama dei Peligni (Abruzzo, Italy). Computed tomography and 3D reconstruction of the cranium. *Rivista di Antropologia*, **81** : 69-78.
46. BRUNER, E., MANZI, G., ARSUAGA, J. L. (2003b) : Encephalization and allometric trajectories in the genus *Homo*: Evidence from the Neandertal and modern lineages. *PNAS*, **100** (26) : 15335-15340.
47. BRUNER, E., MANZI, G. (2005) : CT-Based Description and Phyletic Evaluation of the Archaic Human Calvarium from Ceprano, Italy. *The Anatomical Record Part A*, **285A** : 643-658.
48. BRUNET, M., GUY, F., PILBEAM, D., MACKAYE, H. T., LIKIUS, A., AHOUNTA, D., BEAUVILAIN, A., BLONDEL, C., BOCHERENS, H., BOISSERIE, J.-N., de BONIS, L., COPPENS, Y., DEJAX, J., DENYS, C., DURINGER, P., EISENMANN, V., FANONE, G., FRONTY, P., GERAADS, D., LEHMANN, T., LIHOREAU, F., LOUCHART, A., MAHAMAT, A., MERCERON, G., MOUCHELIN, G., OTERO, O., CAMPOMANES, P. P., PONCE de LEON, M., RAGE, J.-C., SAPANET, M., SCHUSTER, M., SUDRE, J., TASSY, P., VALENTIN, X., VIGNAUD, P., VIRIOT, L., ZAZZO, A., ZOLLIKOFER, C. (2002) : A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature*, **418** : 145-151.
49. CAMERON, D. W., GROVES, C. P. (2004a) : Bones, Stones and Molecules. San Diego: Elsevier Academic Press. 402p.

50. CAMERON, D., PATNAIK, R., SAHNI, A. (2004b) : The phylogenetic significance of the Middle Pleistocene Narmada hominin cranium from central India. *International Journal of Osteoarchaeology*, **14**(6) : 419-447.
51. CAPITAN, L., PEYRONY, D. (1909) : Deux squelettes humains au milieu de foyers de l'époque moustérienne. *Revue anthropologique*, **19** : 402-409.
52. CARAMELLI, D., LALUEZA-FOX, C., VERNESI, C., LARI, M., CASOLI, A., MALLEGNI, F., CHIARELLI, B., DUPANLOUP, I., BERTRANPETIT, J., BARBUJANI, G., BERTORELLE, G. (2003) : Evidence for a genetic discontinuity between Neandertals and 24,000-year-old anatomically modern Europeans. *PNAS*, **100** : 6593-6597.
53. CHALINE, J., DAVID, B., MAGNIEZ-JANNIN, F., DAMBRICOURT MALASSE, A., MARCHAND, D., COURANT, F., MILLET, J.-J. (1998) : Quantification de l'évolution morphologique du crâne des Hominidés et hétérochronies. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la terre et des planètes*, **326** : 291 - 298.
54. CHAMLA, M.-C. (1981-1982) : Une nouvelle datation du crâne de l'homme de Petralona, Grèce. *L'Anthropologie, (Paris)*, **85/86**(3) : 525-527.
55. CHEN, T., YUAN, S., GUO, S., HU, Y. (1987) : Uranium series dating of fossil bones from the Hexian and Chaoxian human fossil sites. *Acta Anthropologica Sinica*, **6** : 249-254.
56. CLARK, J. D., ASFAW, B., ASSEFA, G., HARRIS, J. W. K., KURASHINA, H., WALTER, R. C., WHITE, T. D., WILLIAMS, M. A. J. (1984) : Paleoanthropological discoveries in the Middle Awash Valley, Ethiopia. *Nature*, **307** : 423-428.
57. CLARK, J.D., HEINZELIN, J. de, SCHICK, K. D., HART, W. K., WHITE, T. D., WOLDEGABRIEL, G., WALTER, R. C., SUWA, G., ASFAW, B., VRBA, E., H.-SELASSIE, Y. (1994) : African Homo erectus: old radiometric ages and young Oldowan assemblages in the Middle Awash valley, Ethiopia. *Science*, **264** : 1907-1910.
58. CLARK, J. D., BEYENE, Y., WOLDEGABRIEL, G., HARTK, W. K., RENNE, P. R., GILBERT, H., DEFLEUR, A., SUWA, G., KATOH, S., LUDWIG, K. R., BOISSERIE, J.-R., WHITE, B., WHITE, T. D. (2003) : Stratigraphic, chronological and behavioural contexts of Pleistocene Homo sapiens from Middle Awash, Ethiopia. *Nature*, **423** : 747-752.
59. CLARKE, R. J. (2000) : A corrected reconstruction and interpretation of the *Homo erectus* calvaria from Ceprano, Italy. *Journal of Human Evolution*, **39** : 433-442.
60. CONDEMI, S. (1992) : Les Hommes fossiles de Saccopastore et leurs relations phylogénétiques. Paris. 174p.
61. CONDEMI, S. (2003) : Les Néandertaliens. In C. SUSANNE, E. REBATO, B. CHIARELLI, (eds.): *Anthropologie Biologique. Evolution et Biologie Humaine*. Bruxelles: De Boeck. p. 271-279.

62. CONROY, G., JOLLY, C., CRAMER, D., KALB, J. (1978) : Newly discovered fossil hominid skull from the Afar depression, Ethiopia. *Nature*, **267** : 60-70.
63. CONROY, G. C., VANNIER, M. W. (1985) : Endocranial Volume Determination of Matrix-Filled Fossil Skulls Using High-Resolution Computed Tomography. In P. V. TOBIAS (ed.): Hominid Evolution: Past, Present and Future. New York: LISS, A. R., Inc.p419-426.
64. CONROY, G. C., WEBER, G. W., SEIDLER, H., TOBIAS, P. V., KANE, A., BRUNSDEN, B. (1998): Endocranial Capacity in an Early Hominid Cranium from Sterkfontein, South Africa. *Science*, **280** : 1730-1731.
65. CONROY, G.C., FALK, D., GUYER, J., WEBER, G. W., SEIDLER, H., RECHEIS, W. (2000a) : Endocranial Capacity in Sts 71 (*Australopithecus africanus*) by Three-Dimensional Computed Tomography. *The Anatomical Record*, **258** : 391-396.
66. CONROY, G. C., WEBER, G. W., SEIDLER, H., RECHEIS, W., zur NEDDEN, D., MARIAM, J. H. (2000b) : Endocranial capacity of the Bodo cranium determined from three-dimensional computed tomography. *American Journal of Physical Anthropology*, **113** : 111-118.
67. COON, C. S. (1952) : The excavations at Hotu Cave. *Trans N Y Acad Sci*, **14**(4) : 179-180.
68. COQUEUGNIOT, H., HUBLIN, J.-J., VEILLON, F., HOUËT, F., JACOB, T. (2004) : Early brain growth in *Homo erectus* and implications for cognitive ability. *Nature*, **431** : 299-302.
69. COUTSELINIS, A., DRITSAS, C., PITSIOS, T. (1991) : Expertise médico-légale du crâne Pléistocène LA01/S2 (Apidima II), Apidima, Laconie, Grèce. *L'Anthropologie* (Paris), **95**(2/3) : 401-408.
70. CUNNINGHAM, D. J. (1908) : The evolution of the eyebrow region of the forehead with special reference to the excessive supraorbital development in the Neanderthal race. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **46**:243-310.
71. DAMBRICOURT-MALASSE, A. (2000a) : Approche Biodynamique des angulations de la base du crâne de l'embryogenèse à la morphogenèse post-natale. In ARTCOM' (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléoanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 24-43.
72. DAMBRICOURT-MALASSE, A., MARTIN, J. P., KERVILER, E. de (2000b) Neural Tube, Spheno-occipital Flexion and Semi-circular Canals in Modern and Fossil Hominids. *Acta Anthropologica Sinica*, **19 suppl** : 69-76.
73. DART, R. A. (1925) : *Australopithecus africanus* : The Man-Ape of South Africa. *Nature*, **2284**(115) : 195-199.

74. DEBONO, L., MAFART, B., GUIPERT, G. JEUSEL, E. (2004) : Application pratique de la méthode d'estimation de l'âge au décès de Schmitt et Broqua (2000). *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*. **16**(1-2) : 115-120.
75. DECLERCK, J., SUBSOL, G., THIRION, J.-P., AYACHE, N. (1995) : Automatic Retrieval of Anatomical Structures in 3D Medical Images. Rapport de Recherche INRIA n° 2485. Février 1995 : 1-29.
76. DELSON, E., HARVATI, K., REDDY, D., MARCUS, L. F., MOWBRAY, K., SAWYER, G. J., JACOB, T., MARQUEZ, S. (2001) : The Sambungmachan 3 *Homo erectus* Calvaria: A Comparative Morphometric and Morphological Analysis. *The Anatomical Record (New Anat.)*, **262** : 380 - 397.
77. DÉMIANS D'ARCHIMBAUD, G. (2002) : Les fouilles de l'ancienne cathédrale de Digne : état des questions, *Comptes Rendus de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres*, fasc. Janvier-mars 2001 : 409-438.
78. DETROIT, F. (2000) : The Period of Transition between *Homo erectus* and *Homo sapiens* in East and Southeast Asia: New Perspectives by the Way of Geometric Morphometrics. *Acta Anthropologica Sinica*, **19 suppl** : 62-68.
79. DETROIT, F. (2002) : Origine et évolution des *Homo sapiens* en Asie du Sud-Est: Descriptions et analyses morphométriques de nouveaux fossiles. Thèse du Muséum National d'Histoire Naturelle. Institut de Paléontologie Humaine. Paris.pp 445.
80. DRYDEN, I. L., MARDIA, K. V. (1998) : *Statistical shape analysis*. London: John Wiley and Sons.
81. DUARTE, C., MAURICIO, J., PETTITT, P. B., SOUTO, P., TRINKAUS, E., PLICHT, H. Van Der, ZILHAO, J. (1999) : The early Upper Paleolithic human skeleton from the Abrigo do Lagar Velho (Portugal) and modern human emergence in Iberia. *PNAS*, **96** : 7604-7609.
82. FAJARDO, R. J., MÜLLER, R. (2001) : Three-Dimensional Analysis of Nonhuman Primate Trabecular Architecture Using Micro-Computed Tomography. *American Journal of Physical Anthropology*, **115** : 827-836.
83. FAJARDO, R. J., RYAN, T. M., KAPPELMAN, J. (2002) : Assessing the Accuracy of High-Resolution X-Ray Computed Tomography of Primate Trabecular Bone by Comparisons With Histological Sections. *American Journal of Physical Anthropology*, **118** : 1-10.
84. FALK, D., REDMOND, J. C. Jr, GUYER, J., CONROY, C., RECHEIS, W., WEBER, G. W., SEIDLER, H. (2000) : Early hominid brain evolution: a new look at old endocasts. *Journal of Human Evolution*, **38**(5) : 695-717.
85. FEIBEL, C. S., BROWN, F. H., Mac DOUGALL, I. (1989) : Stratigraphic context of fossil hominids from the Omo Group deposits: Northern Turkana Basin, Kenya and Ethiopia. *American Journal of Physical Anthropology*, **78** : 595-622.

86. FOX, L. A., VANNIER, M. W., WEST, O. C., WILSON, A. J., BARAN, G. A., PILGRMA, T. K. (1995) : Diagnostic Performance of CT, MPR and 3DCT Imaging in Maxillofacial Trauma. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, **19** (5) : 385-395.
87. FRIESS, M. (2000) : Application des "Thin-Plate Splines" en Paléanthropologie: Nouvelles données et leur implications pour l'origine de l'Homme moderne. In ARTCOM' (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 102-111.
88. FRIESS, M., MARCUS, F. L., REDDY, D. P., DELSON, E. (2002) : The Use of 3D Laser Scanning Techniques for the Morphometric Analysis of Human Facial Shape Variation. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 31-35.
89. FUHLROTT., C. von (1859)/ Menschliche Überreste aus einer Felsengrotte des Düsselthals. *Verh. naturk. Ver. der preuss. Rheinl*, **16** : 131-153.
90. FUSTE, M. (1958) : Endokranialer Ausguss der Neandertaler Parietale von Cova Negra. *Anthropologischer Anzeiger*, **21** : 208-273.
91. GABUNIA, L., VEKUA, A., LORDKIPANIDZE, D., SWISHER III, C. C., FERRING, R., JUSTUS, A., NIORADZE, M., TVALCHRELIDZE, M., ANTON, S. C., BOSINSKI, G., JÖRIS, O., LUMLEY, M-A. de, MAJSURADZE, G., MOUSKHELISHVILI, A. (2000) : Earliest Pleistocene Hominid Cranial remains from Dmanisi, Republic of Georgia: Taxonomy, Geological Setting, and Age. *Science*, **288** : 1019 - 1025.
92. GABUNIA, L., ANTON, S. C., LORDKIPANIDZE, D., VEKUA, A., JUSTUS, A., SWISHER III, C. C. (2001) : Dmanisi and Dispersal. *Evolutionary Anthropology*, **10** : 158-170.
93. GABUNIA, L., LUMLEY, M-A. de, VEKUA, A., LORDKIPANIDZE, D., LUMLEY, H. de (2002) : Découverte d'un nouvel hominidé à Dmanissi (Transcaucasie, Géorgie). *C. R. Palevol*, **1** : 1-11.
94. GERAADS, D., HUBLIN, J.-J., JAEGER, J.-J., TONG, H., SEN, S., TOUBEAU, P. (1986) : The Pleistocene hominid site of Ternifine, Algeria: New results on the environment, age, and human industries. *Quaternary Research* **25**(3) : 380-386.
95. GILBERT, W. H., WHITE, T. D., ASFAW, B. (2003) : *Homo erectus*, *Homo ergaster*, *Homo "cepranensis"*, and the Daka cranium. *Journal of Human Evolution*, **45** : 255-259.
96. GORGANOVIC-KRAMBERGER D (1906) : Der diluviale mensch von Krapina in Kroatien: ein beitrag zur paläoanthropologie. Wiesbaden: C. W Kreidel. Verlag.

97. GRIMAUD, D. (1982a) : Le pariétal de l'Homme de Tautavel. In 1er Congrès international de Paléontologie Humaine. L'*Homo erectus* et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles, pp. 62-88.
98. GRIMAUD, D. (1982b) : *Evolution du pariétal de l'Homme fossile. Position de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés*. Doctorat de 3ème cycle: "Géologie des formations sédimentaires", option: Géologie du Quaternaire et Préhistoire. 706 p.
99. GRIMAUD-HERVE D, JACOB, T. (1983) : Les Pariétaux du Pithécantrophe Sangiran 10. *L'Anthropologie*, (Paris) **87** : 469-474.
100. GRIMAUD-HERVE, D., WIDIANTO, H., JACOB, T. (2000): Two New Human Fossil Remains Discovered in Sangiran (Central Java, Indonesia). *Acta Anthropologica Sinica*, **19 suppl** : 41-45.
101. GROVES, C. P. (1989) : A theory of human and primate evolution. Oxford: Oxford University Press. 402 p.
102. GRÜN, R. (1996) : A re-analysis of electron spin resonance dating results associated with the Petralona hominid. *Journal of Human Evolution*, **30** : 227-241.
103. GRÜN, R., STRINGER, C. B. (1991) : Electron spin resonance dating and the evolution of modern humans. *Archaeometry*, **33** : 153-199.
104. GRÜN, R., HUANG, P.-H., HUANG, W., McDERMOTT, F., THORNE, A., STRINGER, C. B., YAN, G. (1998) : ESR and U-series analyses of teeth from the palaeoanthropological site of Hexian, Anhui Province, China. *Journal of Human Evolution*, **34**(6) : 555-564.
105. GRÜN, R., STRINGER, C., McDERMOTT, F., NATHAN, R., PORAT, N., ROBERTSON, S., TAYLOR, L., MORTIMER, G., EGGINS, S., MCCULLOCH, M. (2005) : U-series and ESR analyses of bones and teeth relating to the human burials from Skhul. *Journal of Human Evolution*, **49** : 316-334.
106. GÜGEL, I. L., KUNZELMANN, K.-H. (2002) : Simulation and 3D-Laser-Scanning of Dental Abrasion. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 83-88.
107. GUIPERT, G. (2003) : Modélisation tridimensionnelle et exploitation de données crâniennes scanographiques. Utilisation de Yav++. Mémoire de DESS, Faculté de Luminy, Marseille.
108. GUIPERT, G., SUBSOL, G., JESSEL, J.-P., DELINGETTE, H., MAFART, B. (2003): The Fovea Project: A New Look at Human Past. In VSMM (ed.): Proceedings of the VSMM 2003, pp. 43-47.
109. GUIPERT, G., LUMLEY, M.-A. de, LUMLEY, H. de, MAFART, B. (2004) : Three-Dimensional Imagery: a New Look at the Tautavel Man. In SW (Eds) (ed.): [Enter the Past] The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage | CAA 2003 | Computer

- Applications and Quantitative Methods | Proceedings of the 31st Conference, Vienna, Austria, April 2003. Wien: BAR International Series, pp. 100-102.
110. GUIPERT, G., MAFART, B.: Evolution de l'os frontal d'*Homo heidelbergensis* et *Homo neanderthalensis* et comparaison avec l'homme moderne. *Anthropologie* (Brno). Sous presse.
 111. GUNZ, P., MITTEROECKER, P., BOOKSTEIN, F. L., WEBER, G. W. (2004) : Computer Aided Reconstruction of Human Crania. In SW (Eds) (ed.): [Enter the Past] The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage | CAA 2003 | Computer Applications and Quantitative Methods | Proceedings of the 31st Conference, Vienna, Austria, April 2003. Wien: BAR International Series, pp. 92-95.
 112. GUY, F., BRUNET, M., SCHMITTBUHL, M., VIRIOT, L. (2003) : New Approaches in Hominoid Taxonomy: Morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology*, **121** : 198-218.
 113. HARVATI, K. (2002) : Models of Shape Variation between and within species and the Neanderthal Taxonomic position: A 3D Geometric Morphometrics Approach Based on Temporal Bone Morphology. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 25-30.
 114. HARVATI, K. (2003a) : Quantitative Analysis of Neanderthal Temporal Bone Morphology Using Three-Dimensional Geometric Morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology*, **120** : 323-338.
 115. HARVATI, K. (2003b) : The Neanderthal taxonomic position: models of intra- and inter-specific craniofacial variation. *Journal of Human Evolution*, **44** : 107-132.
 116. HARVATI, K., FROST, S. R., McNULTY, K. P. (2004) : Neanderthal taxonomy reconsidered: Implications of 3D primate models of intra- and interspecific differences. *PNAS*, **101** : 1147-1152.
 117. HAWKS, J. D., OH, S., HUNLEY, K., DOBSON, S., CABANA, G., DAYALU, P., WOLPOFF, M.W. (2000) : An Australasian test of the recent African origin theory using the WLH-50 calvarium. *Journal of Human Evolution*, **39** : 1-22.
 118. HAWKS, J. D., WOLPOFF, M. H. (2001) : The four faces of Eve: hypothesis compatibility and human origins. *Quaternary International*, **75** : 41-50.
 119. HEIM, J.-L. (1976) : Les Hommes Fossiles de La Ferrassie. Tome I. Le gisement, les squelettes adultes (crâne et squelette du tronc) *Archives de L'Institut de Paléontologie Humaine*, mémoire 35, Masson, Paris, 397 p.
 120. HEIM, J.-L. (1986) : Les hommes de Néandertal. In Doin (ed.): L'Homme, son évolution, sa diversité. Manuel d'anthropologie physique. Paris: Edition du CNRS, pp. 201 - 215.

121. HEIM, J.-L. (1990) : Le crâne de la Chapelle-aux-Saints: un nouveau visage de l'Homme de Neandertal. In Association pour la Recherche Archéologique en Limousin (ed.) : La Chapelle-aux-Saints et la préhistoire en Corrèze. Bordeaux: RAYNAL, J. P., PAUTRAT, Y., pp. 49-61.
122. HEIM, J.-L., GRANAT, J. (2000) : Les proportions relatives de la face et du neurocrâne chez les Hommes du Paléolithique moyen. In ARTCOM' (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléoanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 131-141.
123. HENNIG, G. J., HER, W., WEBER, E., XIROTIRIS, N. I. (1981) : E.S.R dating of the fossil hominid cranium from Petralona Cave, Greece. *Nature*, **292** : 533-536.
124. HENRY-GAMBIER, D. (2002) : Les fossiles de Cro-Magnon (Les Eyzies-de-Tayac, Dordogne): Nouvelles données sur leur position chronologique et leur attribution culturelle. PALEO 14, Décembre 2002.
125. HOWATSON, M. C. (1993) : Dictionnaire de l'Antiquité. Paris. p1066.
126. HOWELL, F. C. (1978) : Hominidae. In MAGLIO, V. J., COOKE, H. B. S. (ed.): Evolution of African Mammals. Cambridge: Harvard University Press, pp. 154-248.
127. HUBLIN, J. J. (1980) : A propos de restes inédits du gisement de la Quina (Charente): un trait méconnu des Néandertaliens et des Prénéandertaliens. *L'Anthropologie (Paris)*, **84** : 81-88.
128. HUBLIN, J. J. (1991) : L'émergence des *Homo sapiens* archaïques: Afrique du nord-ouest et Europe occidentale. Doctorat d'état. Université de Bordeaux 1, Bordeaux.
129. HUBLIN, J.-J., SPOOR, F., BRAUN, M., ZONNEVELD, F., CONDEMI, S. (1996) : A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts. *Nature*, **381** : 224-226.
130. HUFFMAN, O. F. (2001) : Geologic context and age of the Peking/Mojokerto *Homo erectus*, East Java. *Journal of Human Evolution*, **40** : 353-362.
131. HYODO, M., WATANABE, N., SUNATA, W., SUSANTO, E. E., WAHYONO, H. (1993) : Magnetostratigraphy of hominid fossil bearing informations in Sangiran and Mojokerto, Java. *Anthropological Science*, **101**(2):157-186.
132. ILLERHAUS, B., GOEBBELS, J., RIESEMEIER, H., STRAIGER, H. (1997) : Correction techniques for detector systems in 3D-CT. *Proceedings of SPIE*, **3149** : 101-106.
133. JACOB, T. (1975) : Morphology and paleoecology of early man in Java. In TUTTLE, R. (ed.) : Paleoanthropology: morphology and paleoecology. The Hague: Mouton, pp. 311-325.
134. JEFFERY, N. (2002) : A high-resolution MRI study of linear growth of the human fetal skull base. *Neuroradiology*, **44** : 358-366.

135. JEFFERY, N., SPOOR, F. (2004) : Ossification and Midline Shape Changes of the Human Fetal Cranial Base. *American Journal of Physical Anthropology*, **123** : 78-90.
136. JOHANSON, D.C., EDEY, M. (1983) : Lucy, une jeune femme de 3 500 000 ans. Paris: Robert Laffont Edition. 367p.
137. JONES, T. R. (1868) : On the human skulls and bones found in the cave of Cro-Magnon, near Les Eyzies: Reliquiae aquitanicae.
138. JORDA CERDA, F. (1946) : La Cova Negra de Bellus (Jativa) y sus industrias liticas. *Arch. Prehist. Levantina*, **2** : 11-29.
139. KÄHLER, K., HABER, J., SEIDEL, H.-P. (2001) : Reanimating the Dead: Reconstruction of Expressive Faces from Skull Data. In CGP ACM SIGGRAPH, Annual Conference Series (ed.) : Proceedings ACM SIGGRAPH 2001.
140. KALVIN, A., D., DEAN, D., HUBLIN, J.-J. (1995): Reconstruction of Human Fossils. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **15** : 12-15.
141. KEITH, A.(1927) : Report on the Galilee skull, In: Turville Petre F. (Ed.), Researches in prehistoric Galilee, 1925-1926, Council of the British School of Archaeology in Jerusalem, 1927, pp. 593-623.
142. KIM, D.-O., KIM, H.-J., JUNG, H., JEONG, H.-K., HONG, S.-I., KIM, K.-D. (2002) : Quantitative Evaluation of Acquisition Parameters in Three-Dimensional Imaging with Multidetector Computed Tomography Using Human Skull Phantom. *Journal of Digital Imaging* **15**, Suppl **1** : 254-257.
143. KOKKOROS, P., KANELIS, A. (1960) : Découverte d'un crâne d'homme paléolithique dans la péninsule Chalcidique. *L'Anthropologie*, **64**(5-6) : 438-446.
144. KRAGSKOV J, BOSCH, C., GYLDENSTED, C., SINDET-PETERSEN, S. (1997) : Comparison of the Reliability of Craniofacial Anatomic Landmarks Based on Cephalometric Radiographs and Three-Dimensional CT Scans. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, **34** : 111-116.
145. KRINGS, M., STONE, A., SCHMITZ, R. W., KRAINITZKI, H., STONEKING, M., PÄÄBO, S. (1997) : Neandertal DNA Sequences and the Origin of Modern Humans. *Cell*, **90** : 19-30.
146. KULLMER, O., HUCK, M., ENGEL, K., SCHRENK, F., BROMAGE, T. (2002) : Hominid Tooth Pattern Database (HOTPAD) Derived from Optical 3D Topometry. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 71-82.
147. KUSTAR, A. (1999): Facial Reconstruction of an Artificially Distorted Skull of the 4th to the 5th Century from the Site of Mözs. *International Journal of Osteoarchaeology*, **9** : 325-332.

148. LEAKEY, L. S. B. (1959) : A new fossil skull from Olduvai. *Nature*, **184** : 491-493.
149. LEAKEY, L.S.B. (1961) : New Finds at Olduvai Gorge. *Nature*, **189** : 649-650.
150. LEAKEY, L. S. B., TOBIAS, P. V., NAPIER, J. R. (1964) : A New Species of the Genus *Homo* from Olduvai Gorge. *Nature*, **202** : 7-9.
151. LEAKEY, M. D. (1971) : *Olduvai Gorge*. Excavations in Beds I and II, 1960-1963. Cambridge: Cambridge University Press, 569p.
152. LEAKEY, M. D., HAY, R. L. (1982) : The chronological positions of the fossil hominids of Tanzania. In Hd Lumley (ed.): *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés fossiles*, 1^{er} Congrès International de Paléontologie humaine, pré tirage, pp. 753-765.
153. LEAKEY, M. G., SPOOR, F., BROWN, F. H., GATHOGO, P. N., KIARIE, C., LEAKEY, L. N., McDOUGALL, I. (2001) : New hominin genus from eastern Africa shows diverse middle Pliocene lineages. *Nature*, **410** : 433-440.
154. LEAKEY, R. E. F. (1973) : Evidence for an advanced Plio-Pleistocene hominid from East Rudolf, Kenya. *Nature*, **242** : 447-450.
155. LEAKEY, R. E. F. (1974) : Further evidence of Lower Pleistocene hominids from East Rudolf, North Kenya. *Nature*, **248** : 653-656.
156. LEAKEY, R. E. F. (1976) : New hominid fossils from the Koobi Fora Formation in Northern Kenya. *Nature*, **261** : 574-576.
157. LEAKEY, R. E. F., WALKER, A. C. (1976) : *Australopithecus*, *Homo erectus* and the single species hypothesis. *Nature*, **261** : 572-574.
158. LEGUEBE, A. (1986a) : Importance des découvertes de Néandertaliens en Belgique pour le développement de la paléontologie humaine. *Bulletin de la Société royale belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, **97** : 13 - 31.
159. LEGUEBE, A., CAHEN, D. (1986b) : Au Temps des Hommes de Spy. Nos ancêtres, les Néandertaliens. Bruxelles: Crédit Communal. LI, X. (1983) : Le paléolithique inférieur en Chine du Nord. *L'Anthropologie* (Paris), **87** : 185-199.
160. L'ENGLE WILLIAMS, F., RICHTSMEIER, J. T. (2003) : Comparison of Mandibular Landmarks from Computed Tomography and 3D Digitizer Data. *Clinical Anatomy*, **16** (6) : 494-500.
161. LI, X. (1983) : Le paléolithique inférieur en Chine du Nord. *L'Anthropologie* (Paris), **87** : 185-199.
162. LIEBERMAN, D. E. (1998) : Sphenoid shortening and the evolution of modern human cranial shape. *Nature*, **393** : 158-162.
163. LIEBERMAN, D. E. (2001) : Another face in our family tree. *Nature*, **410** : 419-420.

164. LIU, Z. C. (1983) : Le remplissage de la grotte de l'Homme de Pékin, Choukoutien - Localité 1. *L'Anthropologie*, **87** : 163-176.
165. LORDKIPANIDZE, D. (1999) : Early Humans at the Gates of Europe. *Evolutionary Anthropology*, **8** : 4.
166. LORDKIPANIDZE, D., VEKUA, A., FERING, R., RIGHTMIRE, P. G., AGUSTI, J., KILADZE, G., MOUSKHELISHVILI, A., NIORADZE, M., PONCE de LEON, M. S., TAPPEN, M., ZOLLIKOFER, C. P. E. (2005) : The earliest toothless hominin skull. *Nature*, **434** : 717-718.
167. LUMLEY, H. de (1988a) : La Grotte du Vallonnet, Roquebrune-Cap-Martin, Alpes-Maritimes. Situation géographique, description, historique. *L'Anthropologie* (Paris), **92** : 387-397.
168. LUMLEY, H. de (1988b) : La stratigraphie du remplissage de la Grotte du Vallonnet. *L'Anthropologie* (Paris), **92** : 407-428.
169. LUMLEY, H. & M.-A. de (1971) : Découvertes de restes humains anténéandertaliens datés du début du Riss à la Caune d'Arago (Tautavel, Pyrénées-Orientales). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **272** : 1729-1742.
170. LUMLEY, H. & M.-A. de (1973) : Pre-Neanderthal Human Remains from Arago Cave in Southeastern France. In *Yearbook of Physical Anthropology*, ed. J. BUETTNER-JANUSCH. Washington, 1973.
171. LUMLEY, H. de, LUMLEY, M.-A. de (1985a) : Place des Anténéandertaliens parmi les *Homo erectus*. Conférence : « L'évolution dans sa réalité et ses diverses modalités ». Masson Editeur, pp. 213 - 219.
172. LUMLEY, H. de, SONAKIA, A. (1985b) : Contexte stratigraphique et archéologique de l'Homme de la Narmada, Hathnora, Madhya Pradesh, Inde. *L'Anthropologie* (Paris), **89** : 3-12.
173. LUMLEY, H. de, LORDKIPANIDZE, D., FERAUD, G., GARCIA, T., PERRENOUD, C., FALGUERES, C., GAGNEPAIN, J., SAOS, T., VOINCHET, P. (2002) : Datation par la méthode $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ de la couche de cendres volcaniques (couche VI) de Dmanissi (Géorgie) qui a livré des restes d'hominidés fossiles de 1,81 Ma. *Comptes Rendus Palevol*, **1**(3) : 181-189.
174. LUMLEY, M.-A. de (1973) : Anténéandertaliens et Néandertaliens du bassin méditerranéen occidental européen. Marseille: Editions du Laboratoire de Paléontologie Humaine et de Préhistoire. 626p.
175. LYNNERUP, N., HJALGRIM, H., NIELSEN, L. R., GREGERSEN, H., THUESEN, I. (1997) : Non-invasive Archaeology of Skeletal Material by CT Scanning and Three-dimensional Reconstruction. *International Journal of Osteoarchaeology*, **7** : 91-94.

176. MADE, J. van der, MAZO, A.V. (2001) : Spanish Pleistocene Proboscidean diversity as a function of climate. The World of Elephants - International Congress, Rome 2001 : 214-218.
177. MAFART, B. (1984) : Etude anthropologique de la nécropole paléochrétienne et médiévale de La Gayole (Var). Thèse pour le Doctorat en 3ème cycle de Géologie des formations sédimentaires, Université de Provence, 360 p., 100 pl., 160 fig., 180 tabl.
178. MAFART B. (1996) : Particularités anthropologiques et paléopathologiques d'une population de moniales médiévales, l'Abbaye Saint-Pierre de l'Almanarre à Hyères (13°-14°s.). Actes de la XIV^e réunion Histoire et Archéologie d'Antibes, APDCA édit., Antibes, 271-286.
179. MAFART, B. (2002) : 3D Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archeology: A New Tool for Old Sciences or an Emerging Science? In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.): Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 1-3.
180. MAFART, B., MELINE, D., SILVESTRE, A., SUBSOL, G. (1999) : 3D Imagery and Paleontology: Shape differences between the skull of Modern Man and that of Tautavel Man. HIDOINE, B., PAOURI, A., designers et directeurs, vidéo 451-452, Département des Communications Scientifiques Multimédias, INRIA, France. Film présenté à l'exposition *Homo erectus à la conquête du monde*, Musée de l'Homme, Paris, France, en 1999-2000. Version électronique : <http://www.inria.fr/multimedia/Videotheque/0-Fiches-Videos/451-fra.html>.
181. MAFART, B., DELINGETTE, H. (2002) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. XIVth UISPP Congress, pp. 108.
182. MAFART, B., GUIPERT, G., LUMLEY, M.-A. de, SUBSOL, G. (2004) : Three-dimensional computer imaging of hominid fossils: a new step in human evolution studies. *Canadian Association of Radiologist Journal*, **55** : 264-270.
183. MALEZ, M. (1978) : Stratigraphische, Paläofaunistische und Paläolithische Verhältnisse des Fundortes Krapina. In *Krapinski Pracojvek I Evolucija Hominida*, ed. J. A. Z. I. mjetnosti. Zagreb, 1978, pp. 91-102.
184. MALLEGNI, F., CARNIERI, E., BISCONTI, M., TARTARELLI, G., RICCI, S., BIDDITTU, I., SEGRE, A. (2003) : *Homo cepranensis* sp. nov. and the evolution of African-European Middle Pleistocene hominids. *Comptes Rendus Palevol*, **2** : 153-159.
185. MANZI, G. (2004): Human Evolution at the Matuyama-Brunhes Boundary. *Evolutionary Anthropology*, **13** : 11-24.
186. MANZI, G., PASSARELLO, P. (1991) : Anténéandertaliens et néandertaliens du Latium (Italie centrale). *L'Anthropologie* (Paris), **95** : 501 - 522.
187. MANZI, G., SARACINO, B., BRUNER, E., PASSARELLO, P. (2000) : Geometric morphometric analysis of mid-sagittal cranial profiles in Neandertals, modern humans, and their ancestors. *Rivista di Antropologia*, **78** : 193-204.

188. MANZI, G., BRUNER, E., CAPRASECCA, S., GUALDI, G., PASSARELLO, P. (2001a) : CT-scanning and virtual reproduction of the Saccopastore Neandertal crania. *Rivista di Antropologia*, **79** : 61-72.
189. MANZI, G., MALLEGNI, F., ASCENZI, A. (2001b) : A cranium for the earliest Europeans: Phylogenetic position of the hominid from Ceprano, Italy. *PNAS*, **98** : 10011-10016.
190. MANZI, G., BRUNER, E., PASSARELLO, P. (2003) : The one-million-year-old *Homo* cranium from Bouri (Ethiopia): a reconsideration of its *H. erectus* affinities. *Journal of Human Evolution*, **44** : 731-736.
191. MARCUS, L. F., CORTY, M., LOY, A., NAYLOR, G. J. P., SLICE, D. (1996) : *Advances in Morphometrics*. MARCUS, L. F., CORTY, M., LOY, A., NAYLOR, G. J. P., SLICE, D. (Eds) Nato ASI series. New York: Plenum Press.
192. MARQUEZ, S., MOWBRAY, K., SAWYER, G. J., JACOB, T., SILVERS, A. (2001) : New Fossil Hominid Calvaria From Indonesia - Sambungmacan 3. *The Anatomical Record*, **262** : 344-368.
193. MARTIN, R., SALLER, K. (1957) : *Lehrbuch der Anthropologie in Systematischer Darstellung mit Besonderer Berücksichtigung der Anthropologischen Methoden*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag. 661p.
194. McCOWN, T. D., KEITH, A. (1939) : The fossil remains from the Levallois-Mousterian. *In The Stone Age of Mount Carmel*. Oxford: The Clarendon Press.
195. MCDOUGALL, I., BROWN, F. H., FLEAGLE, J. G. (2005): Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia. *Nature* 433:733-736. P. (1986) : A new chronology for the French Mousterian period. *Nature*, **322** : 410-411.
196. MELLARS, P. (1986) : A new chronology for the French Mousterian period. *Nature*, **322** : 410-411.
197. MERCIER, N., VALLADAS, H., JORON, J-L., REYSS, J-L., LEVEQUE, F., VANDERMEERSCH, B. (1991) : Thermoluminescence dating of the late Neanderthal remains from Saint-Césaire. *Nature*, **351** : 737-739.
198. MILLET, J.-J. (2000) : Analyse du champ morphologique infantile Pan et Gorilla et comparaison avec l'architecture crânienne de Homo. *In ARTCOM'* (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 67-78.
199. MIMICS 8.0 : Traitement des Images 3D. Materialise software. http://www.materialise.com/mimics/main_FRA.html
200. MITTEROECKER, P., GUNZ, P., TESCHLER-NICOLA, M., WEBER, G. W. (2004) : Three-Dimensional Imagery: a New Look at the Tautavel Man. *In SW (Eds) (ed.): [Enter the Past] The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage | CAA 2003 |*

- Computer Applications and Quantitative Methods | Proceedings of the 31st Conference, Vienna, Austria, April 2003. Wien: BAR International Series, pp. 96-99.
201. MORWOOD, M. J., SOEJONO, R. P., ROBERTS, R. G., SUTIKNA, T., TURNEY, C. S. M., WESTAWAY, K. E., RINK, W. J., ZHAO, J.-X., BERGH, G. D. van den, DUE, R. A., HOBBS, D. R., MOORE, M. W., BIRD, M. I., KIFIELD, L. K. (2004) : Archaeology and age of a new hominin from Flores in eastern Indonesia. *Nature*, **431** : 1087-1091.
 202. MOVIUS, H. L. Jr (1975) : Excavation of the Abri Pataud Les Eyzies (Dordogne). MOVIUS, H. L. Jr (Ed.) Cambridge: Peabody Museum of Archaeology and Ethnology. American School of Prehistoric Research Peabody Museum Harvard University Bulletin n°30. 305p.
 203. NAMBIAR P, NAIDU, M. D. K., SUBRAMANIAM, K. (1999) : Anatomical Variability of the Frontal Sinuses and Their Application in Forensic Identification. *Clinical Anatomy*, **12** : 16-19.
 204. NIEWOEHNER, W. A. (2001) : Behavioral inferences from the Skhul/Qafzeh early modern human hand remains. *PNAS*, **98** : 2979-2984.
 205. O'HIGGINS, P. (2000) : The study of morphological variation in the hominid fossil record: biology, landmarks and geometry. *Journal of Anatomy*, **197** : 103-120.
 206. O'HIGGINS, P., JONES, N. (1998) : Facial growth in *Cercocebus torquatus*: an application of three-dimensional geometric morphometric techniques to the study of morphological variation. *Journal of Anatomy*, **193** : 251-272.
 207. O'HIGGINS, P., JONES, N. (2004) : Morphologika 1.3.0.0 ; freeware téléchargeable : <http://www.york.ac.uk/res/fme/resources/software.htm>
 208. OAKLEY, K. P., CAMPBELL, B. G., MOLLESON, T. I. (1975) : Catalogue of fossil hominids Part III: Americas, Asia, Australasia. London: Trustees of the British Museum (Natural History). 230p.
 209. ODIN, G., QUATREHOMME, G., SUBSOL, G., DELINGETTE, H., MAFART, B., LUMLEY, M.-A. de (2002) : Comparison of a Three-Dimensional and a Computerized-Assisted Method for Cranio-Facial Reconstruction: Application to Tautavel Man. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.): Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 67-69.
 210. OKAMOTO, K., ITO, J., TOKIGUCHI, S., FURUSAWA, T. (1996) : High-Resolution CT Findings in the Development of the Sphenoccipital Synchondrosis. *American Journal of Neuroradiology*, **17** : 117-120.
 211. OMS, O., PARES, J. M., MARTINEZ-NAVARRO, B., AGUSTI, J., Toro, I., MARTINEZ-FERNANDEZ, G., TURQ, A. (2000) : Early human occupation of Western Europe: Paleomagnetic dates for two paleolithic sites in Spain. *PNAS*, **97** : 10666-10670.

212. PARES, J. M., PEREZ-GONZALES, A. (1995) : Paleomagnetic Age for Hominid Fossils at Atapuerca Archaeological Site, Spain. *Science*, **269** : 830-832.
213. PARES, J. M., PEREZ-GONZALES, A. (1999) : Magnetochronology and stratigraphy at Gran Dolina section, Atapuerca (Burgos, Spain). *Journal of Human Evolution*, **37** : 325-342.
214. PARTRIDGE, T. C. (1973) : Geomorphological dating of cave opening at Makapansgat, Sterkfontein, Swartkrans and Taung. *Nature*, **246** : 75-79.
215. PARTRIDGE, T. C. (1982) : The chronological positions of the fossil hominids of Southern Africa. In Hd Lumley (ed.): *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés fossiles*, 1^{er} Congrès International de Paléontologie humaine, pré tirage, pp. 617-675.
216. PATTE, E. (1955) : Les Néanderthaliens. Paris.
217. PATURET, G. (1951) : *Ostéologie, Arthrologie - Myologie*. Paris.
218. PENIN, X., BAYLAC, M. (1999) : Comparaison tridimensionnelle des crânes de *Pan* et *Pongo* par superpositions procrustéennes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la vie* 322:1099 - 1104.
219. PENIN, X., BERGE, C., BAYLAC, M. (2002) : Ontogenetic Study of the Skull in Modern Humans and the Common Chimpanzees: Neotenic Hypothesis Reconsidered With a Tridimensional Procrustes Analysis. *American Journal of Physical Anthropology*, **118** : 50-62.
220. PIVETEAU, J. (1957) : Les Primates et l'Homme. Ed MASSON, Traité de Paléontologie Tome VII. Paris. 675p.
221. PONCE de LEON, M. S. (2002) : Computerized Paleoanthropology and Neanderthals: The Case of Le Moustier 1. *Evolutionary Anthropology*, **11** : 68-72.
222. PONCE de LEON, M. S., ZOLLIKOFER, C. P. E. (1999) : New Evidence from Le Moustier 1: Computer-Assisted Reconstruction and Morphometry of the Skull. *The Anatomical Record*, **254** : 474-489.
223. PONCE de LEON, M. S., ZOLLIKOFER, C. P. E. (2001) : Neanderthal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity. *Nature*, **412** : 534-538.
224. PRAT, S., MARCHAL, F. (2001) : Les premiers représentants du genre Homo en Afrique. Editions ARTCOM', Guides de la Préhistoire Mondiale, Vol 3, Paris. 206p.
225. PROSSINGER, H., BOOKSTEIN, F., SCHÄFER, K., SEIDLER, H. (2000): Reemerging Stress: Supraorbital Torus Morphology in the Mid-Sagittal Plane? *The Anatomical Record (New Anat.)*, **261** : 170-172.
226. PROSSINGER, H., SEIDLER, H., WICKE, L., WEAVER, D., RECHEIS, W., STRINGER, C., MÜLLER, G. B. (2003) : Electronic Removal of Encrustation Inside the

- Steinheim Cranium Reveal Paranasal Sinus Features and Deformations, and Provides a Revised Endocranial Volume Estimate. *The Anatomical Record (New Anat.)*, **237B** : 132-142.
227. QIU, M.-G., ZHANG, S.-X., LIU, Z.-J., TAN, L.-W., WANG, Y.-S., DENG, J.-H., TANG, Z.-S. (2003): Plastination and Computerized 3D Reconstruction of the Temporal Bone. *Clinical Anatomy*, **16** : 300-303.
228. QUATREHOMME, G., COTIN, S., SUBSOL, G., DELINGETTE, H., GARIDEL, Y., GREVIN, G., FIDRICH, M., BAILET, P., OLLIER, A. (1997) : A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models. *J. Forensic Sci.*, **42** (4) : 649-652.
229. RAE, T. C., KOPPE, T. (2002) : 3D Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archeology: A New Tool for Old Sciences or an Emerging Science? In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.): *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 11-16.
230. RAPIDFORMTM2004 : Logiciel de traitement de scanners 3D. INUS Company. <http://www.rapidform.com/>
231. RAYNAL, J. P. (1990) : Essai de datation directe. In RAYNAL, J. P., PAUTRAT, Y. (ed.): *La Chapelle-aux-Saints et la préhistoire en Corrèze*. Bordeaux: La Nef, pp. 43-46.
232. RECHEIS, W., WEBER, G. W., SCHAFER, K., PROSSINGER, H., KNAPP, R., SEIDLER, H., D. zur NEDDEN (1999): New Methods and Techniques in Anthropology. *Coll. Antropol.* **23** (2) : 495 - 509.
233. REICHS, K. J. (1993) : Quantified comparison of frontal sinus patterns by means of computed tomography. *Forensic Science International*, **61** : 141-168.
234. RICHTSMEIER, J. T., CHEVERUD, J. M., LELE, S. (1992) : Advances in anthropological morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, **21** : 283-305.
235. RICHTSMEIER, J. T., DELEON V. B., LELE S. R. (2002) : The Promise of Geometric Morphometrics. *Yearbook of Physical Anthropology*, **45** : 63-91.
236. RIGHTMIRE, P. (1979) : Cranial remains from *Homo erectus* from bed II and IV, Olduvai Gorge, Tanzania. *American Journal of Physical Anthropology*, **51** : 99-116.
237. RIGHTMIRE, P. (1986) : Problèmes dans la classification des *Homo* du Pléistocène moyen. Les restes humains de Tautavel comparés aux Hominidés provenant du lac Ndutu et de Broken Hill. *L'Anthropologie* (Paris), **90** : 483-493.
238. RIGHTMIRE, P. (1990) : *The evolution of Homo erectus. Comparative anatomical studies of an extinct human species*. Cambridge: Cambridge University Press, 669p.
239. RIGHTMIRE, G. P. (1996) : The human cranium from Bodo, Ethiopia: evidence for speciation in the Middle Pleistocene? *Journal of Human Evolution*, **31** : 21-39.

240. RIGHTMIRE, G. P. (1998) : Human evolution in the Middle Pleistocene: the role of *Homo heidelbergensis*. *Evolutionary Anthropology*, **6** : 218-227.
241. RINK, W. J., SCHWARCZ, H. P., SMITH, F. H., RADOVCIC, J. (1995) : ESR dates for Krapina hominids. *Nature*, **378** : 24.
242. ROBSON BROWN, K., WOOD, H. (1999) : The utility of Minimal CT Scanning in the Study of Two Egyptian Mummy Heads. *International Journal of Osteoarchaeology*, **9** : 199-204.
243. ROHLF, F. J. (1996) : Morphometric spaces, shape components and the effects of linear transformations. In L. F. MARCUS *et al.* (eds.): *Advances in Morphometrics*. New York: Plenum Press, pp. 117-129.
244. ROOK, L., BONDIOLI, L., CASALI, F., ROSSI, M., KÖHLER, M., MOYA SOLA, S., MACCHIARELLI, R. (2004) : The bony labyrinth of *Oreopithecus bambolii*. *Journal of Human Evolution*, **46** : 347-354.
245. ROSAS, A., BASTIR, M. (2002) : Thin-Plate Spline Analysis of Allometry and Sexual Dimorphism in the Human Craniofacial Complex. *American Journal of Physical Anthropology*, **117** : 236-245.
246. ROSAS, A. (2003) : Les fossiles humains d'Atapuerca et le modèle d'évolution humaine durant le dernier million d'années. In C. SUSANNE, E. REBATO, B. CHIARELLI (eds.): *Anthropologie Biologique. Evolution et Biologie Humaine*. Bruxelles: De Boeck. p. 265-270.
247. ROUGIER, H. (2003) : Étude descriptive et comparative de Biache-Saint-Vaast 1 (Biache-Saint-Vaast, Pas-de-Calais, France), Thèse de doctorat, Bordeaux 1, Bordeaux. 418p.
248. RÜHLI, F. J., LANZ, C., ULRICH-BOCHSLER, S., ALT, K. W. (2002) : State-of-the-art Imaging in Paleopathology: the Value of Multislice Computed Tomography in Visualizing Doubtful Cranial Lesions. *International Journal of Osteoarchaeology*, **12** : 372-379.
249. SANTA LUCA, A. P. (1978) : A Re-examination of Presumed Neandertal-like Fossils. *Journal of Human Evolution*, **7** : 619-636.
250. SANTLER, G., KÄRCHER, H., GAGGL, A., KERN, R. (1998) : Stereolithography Versus Milled Three-Dimensional Models: Comparison of Production Method, Indication, and Accuracy. *Computer Aided Surgery*, **3** : 248-256.
251. SARTONO, S. (1971) : Observations on a new skull of *Pithecanthropus erectus* (*Pithecanthropus* VIII) from Sangiran, Central Java. *Proc. Acad. Sci. Amst. B.*, **74** : 185-194.
252. SARTONO, S. (1982) : Characteristics and chronology of early men in Java. 1er Congrès international de Paléontologie Humaine *L'Homo erectus* et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles, pp. 491-541.

253. SCHMITZ, R. W., SERRE, D., BONANI, G., FEINE, S., HILLGRUBER, F., KRAINITZKI, H., PÄÄBO, S., SMITH, F. H. (2002) : The Neandertal type site revisited: Interdisciplinary investigations of skeletal remains from the Neander Valley, Germany. *PNAS*, **99** : 13342-13347.
254. SEIDLER, H., FALK, D., STRINGER, C., WILFING, H., MÜLLER, G. B., zur NEDDEN, D., WEBER, G. W., REICHEIS, W., ARSUAGA, J.-L. (1997) : A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill: implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution. *Journal of Human Evolution*, **33** : 691-703.
255. SEIDLER, H., WEBER, G. W., MARIAM, A. J. H., NEDDEN, D. zur, REICHEIS, W. (2000) : CD ROM EDITION « FOSSIL HOMINIDS » Institute for Anthropology, University of Vienna. Bodo 1.
256. SEMAH, F., SARTONO, S., ZAIM, Y., DJUBIANTONO, T. (1981-1982) : L'âge et l'environnement des *Homo erectus* de Java: nouveaux résultats paléomagnétiques et palynologiques. *L'Anthropologie (Paris)*, **85-86**(3) : 509-516.
257. SEMENDEFERI, K., DAMASIO, H., FRANK, R., van HOESEN, GW. (1997) : The evolution of the frontal lobes: a volumetric analysis based on three-dimensional reconstructions of magnetic resonance scans of human and ape brains. *Journal of Human Evolution*, **32** : 375-388.
258. SERRE, D., LANGANEY, A., CHECH, M., TESCHLER-NICOLA, M., PAUNOVIC, M., MENNECIER, P., HOFREITER, M., POSSNERT, G., PÄÄBO, S. (2004) : No Evidence of Neandertal mtDNA Contribution to Early Modern Humans. *PLOS Biology*, **2**(3) : 313-317.
259. SLICE, D. E., BOOKSTEIN, F. L., MARCUS, L. F., ROHLF, F. J. (1996) : A glossary for geometric morphometrics. In L. F. MARCUS *et al.* (eds.): *Advances in Morphometrics*. New York: Plenum Press, pp. 531-551.
260. SMITH, F. H., GAINES, J. B., KRUSKO, N. A. (1999) : A Juvenile Human Frontal Bone from the French Upper Palaeolithic Site of Lacave: Significance and Problems of Interpretation. *International Journal of Osteoarchaeology*, **9** : 237-243.
261. SMITH, T. D., SIEGEL, M. I., MOONEY, M. P., BURDI, A. R., TODHUNTER, J. S. (1996): Vomeronasal Organ Growth and Development in Normal and Cleft Lip and Palate Human Fetuses. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, **33** : 385-394.
262. SOHN, S., WOLPOFF, M. H. (1993) : Zuttiyeh Face: A View From the East. *American Journal of Physical Anthropology*, **91** : 325-347.
263. SOMME, J., TUFFREAU, A., AITKEN, M. J., AUGUSTE, P., CHALINE, J., COLBEAUX, J.-P., CUNAT-BOGE, N., GEERAERTS, R., HUS, J., HUXTABLE, J., JUVIGNE, E., MUNAUT, A. V., OCCHIETTI, S., PICHET, P., PUISSEGUR, J.-J., ROUSSEAU, D.-D., VAN VLIET-LANOE, B. (1988) : Chronostratigraphie, climats et environnements. In *Le gisement paléolithique moyen de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-*

- Calais). *Stratigraphie, environnement, études archéologiques (1ère partie)*, ed. M. d. I. S. P. Française. Paris: Mémoires de la Société Préhistorique Française, 1988, pp. 115-119.
264. SPITERY, E. (1982) : L'occipital de l'Homme de Tautavel. Essai de reconstitution. In 1er Congrès international de Paléontologie Humaine. *L'Homo erectus* et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles, pp. 89-109.
265. SPITERY, E. (1984) : *Evolution de l'os occipital chez les Hominidés*. Doctorat de 3ème cycle: "Géologie des formations sédimentaires", option Géologie du Quaternaire et Préhistoire, Université de Provence. 460 p.
266. SPITERY, J. (1982) : Le frontal de l'Homme de Tautavel. In 1er Congrès international de Paléontologie Humaine. *L'Homo erectus* et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles, pp. 21 - 61.
267. SPITERY, J. (1984) : L'os frontal des Hommes Fossiles. Thèse de Doctorat de troisième cycle, Université de Provence, Marseille. 398 p.
268. SPOOR, F., WOOD, B., ZONNEVELD, F. (1994) : Implications of early hominid labyrinthine morphology for evolution of human bipedal locomotion. *Nature*, **369** : 645-648.
269. SPOOR, C., ZONNEVELD, F. (1995) : Morphometry of the primary bony labyrinth: a new method based on high-resolution computed tomography. *Journal of Anatomy*, **186** : 569-575.
270. SPOOR, F., WOOD, B., ZONNEVELD, F. (1996) : Evidence for a link between human semicircular canal size and bipedal behaviour. *Journal of Human Evolution*, **30** : 183-187.
271. SPOOR, F., ZONNEVELD, F. (1998): Comparative Review of the Human Bony Labyrinth. *Yearbook of Physical Anthropology* 41:211-251.
272. SPOOR, F., O'HIGGINS, P., DEAN, C., LIEBERMAN, D. E. (1999) : Anterior sphenoid in modern humans. *Nature*, **397** : 572.
273. SPOOR, F., JEFFERY, N., ZONNEVELD, F. (2000) : Using diagnostic radiology in human evolutionary studies. *Journal of Anatomy*, **197** : 61-76.
274. SPOOR, F., BAJPAI, S., HUSSAIN, S. T., KUMAR, K., THEWISSEN, J. G. M. (2002): Vestibular evidence for the evolution of aquatic behaviour in early cetaceans. *Nature*, **417** : 163-166.
275. SPOOR, F., HUBLIN, J. J., BRAUN, M., ZONNEVELD, F. (2003) : The bony labyrinth of Neanderthal. *Journal of Human Evolution*, **44** : 141-65.
276. Statgraphics®Plus 5.0 (2000) : CD.ROM. MANUGISTICS®. Rockville. USA
277. STEIGER, T. (2001) : Nuclear magnetic resonance imaging in paleontology. *Computer & Geosciences*, **27** : 493-495.

278. STRINGER, C. B. (1983) : Some further notes on the morphology and dating of Petralona Hominid. *Journal of Human Evolution*, **12** : 731-742.
279. STRINGER, C. B., HOWELL, F. C., MELENTIS, J. K. (1979) : The Significance of the Fossil Hominid Skull from Petralona, Greece. *Journal of Archaeological Science*, **6** : 235-253.
280. STRINGER, C.B., GRÜN, R., SCHWARCZ, H. P., GOLDBERG, P. (1989) : ESR dates for the Hominid burial site of Es Skhul in Israël. *Nature*, **338** : 756-758.
281. STRINGER, C. B., GRÜN, R. (1991) : Time for the last Neanderthals. *Nature*, **351** : 701-702.
282. STRINGER, C. B., HUBLIN, J.-J. (1999) : New age estimates for the Swanscombe hominid, and their significance for human evolution. *Journal of Human Evolution*, **37** : 873-877.
283. SUBSOL, G., MAFART, B., MELINE, D., SILVESTRE, A., LUMLEY, M-A. (2000) : Traitement d'images scanographiques appliqué à l'étude tridimensionnelle de l'évolution de la forme du crâne humain. In ARTCOM' (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 92-101.
284. SUBSOL, G., MAFART, B., SILVESTRE, A., LUMLEY, M-A. de (2002) : 3D Image Processing for the Study of the Evolution of the Shape of the Human Skull: Presentation of the Tools and Preliminary Results. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.): Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 37-45.
285. SUWA, G., ASFAW, B., BEYENE, Y., WHITE, T. D., KATOH, S., NAGAOKA, S., NAKAYA, H., UZAWA, K., RENNE, P., WOLDEGABRIEL, G. (1997) : The first skull of *Australopithecus boisei*. *Nature*, **389** : 489-492.
286. SUZUKI, H., TAKAI, F. (1970) : *The Amud Man and His Cave Site*. Tokyo: University of Tokyo Press.
287. SWISHER, C. C., RINK, W. J., ANTON, S. C., SCHWARCZ, H. P., CURTIS, G. H., SUPRIJO, A., WIDIASMORO (1996) : Latest *Homo erectus* of Java: potential contemporaneity with *Homo sapiens* in southeast Asia. *Science*, **274** : 1870-1874.
288. TAPPEN, N. C. (1978) : The Vermiculate Surface Pattern of Brow Ridges in Neandertal and Modern Crania. *American Journal of Physical Anthropology*, **49** (1) : 1-10.
289. TATE, J. R., CANN, C. (1982): High-Resolution Computed Tomography for the Comparative Study of Fossil and Extant Bone. *American Journal of Physical Anthropology*, **58** : 67-73.

290. TATTERSALL, I., DELSON, E., COUVERING, J. Van (1988) : Encyclopedia of Human Evolution and Prehistory. TATTERSALL, I., DELSON, E., COUVERING, J. Van (Eds). Garland Publishing New York & London. 603p.
291. THOMPSON, D'A.W. (1917) : *On growth and form*. Cambridge: University press.
292. THOMPSON JL, NELSON, A. J., ILLERHAUS, B. (2002) : 3-D Imaging and Traditional Morphometric Analysis of the Adolescent Neandertal from Le Moustier. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 55-61.
293. THOMPSON, J. L., ILLERHAUS, B. (1998) : A new reconstruction of the Le Moustier 1 skull and investigation of internal structures using 3-D- μ CT data. *Journal of Human Evolution*, **35** : 647-665.
294. THORNE, A. G., WOLPOFF, M. F. (1981) : Regional continuity in Australasian Pleistocene hominid evolution. *American Journal of Physical Anthropology*, **55** : 337-349.
295. TINTANT, H. (1983) : Cent ans après Darwin, continuité ou discontinuité dans l'évolution. In : Modalités, rythmes et mécanismes de l'évolution biologique : gradualisme phylétique ou équilibres ponctués ? Coll. Intern. C.N.R.S. n°330. J. Chaline éd, Paris, C.N.R.S., 1983 : 25-38.
296. TOBIAS, P. V. (1967) : The cranium and maxillary dentition of *Australopithecus (Zinjanthropus) boisei*. Ed DR L. S. B. LEAKEY. Cambridge: Cambridge University Press. 264 pp.
297. TOBIAS, P.V. (2001) : Re-Creating Ancient Hominid Virtual Endocasts by CT-Scanning. *Clinical Anatomy*, **14** : 134-141.
298. TRINKAUS, E. (1973) : A Reconsideration of the Fontéchevade Fossils. *American Journal of Physical Anthropology*, **39** : 25 - 36.
299. TRINKAUS, E. (1988) : The Evolutionary Origins of the Neandertals or, Why where there Neandertals? In ERAUL (ed.) : L'Homme de Neandertal. Vol 3. L'Anatomie. Liège: 1988, pp. 11-29.
300. TRINKAUS, E. (2003) : Neandertal faces were not long; modern human faces are short. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **100** : 8142-8145.
301. TRINKAUS, E., LeMAY, M. (1982) : Occipital Bunning Among Later Pleistocene Hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, **57** (1) : 27-35.
302. TRINKAUS, E., MILOTA, S., RODRIGO, R., MIRCEA, G., MOLDOVAN, O. (2003) Early modern human cranial remains from the Pestera cu Oase, Romania. *Journal of Human Evolution*, **45** : 245-253.
303. TUFFREAU, A. (1988) : Historique des fouilles à Biache-Saint-Vaast. In *Le gisement paléolithique moyen de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). Stratigraphie, environnement,*

- études archéologiques (1ère partie)*, ed. M. d. I. S. P. Française. Paris: Mémoires de la Société Préhistorique Française, 1988, pp. 15-24.
- 304.** ULLRICH, H. (1955) : Das Kinderskelett aus der Grotte Teshik-Tash. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, **47** : 99-121.
- 305.** VALLADAS, H. G., BAR-YOSEF, O., VANDERMEERSCH, B. (1991) : Thermoluminescence dating of Neanderthal and early modern humans in the Near East. *Endeavour, New Series*, **15**(3) : 115 - 119.
- 306.** VALLOIS, H. (1958) : La grotte de Fontéchevade. II : Anthropologie. Paris: Masson & Compagnie.
- 307.** VANDERMEERSCH, B. (1969) : Les nouveaux squelettes moustériens découverts à Qafzeh (Israël) et leur signification. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **268** : 2562-2565.
- 308.** VANDERMEERSCH, B. (1978) : Etude préliminaire du crâne humain du gisement paléolithique de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire ; B.A.F.E.Q.*, **54-55-56** (1.2.3) : 65-67.
- 309.** VANDERMEERSCH, B. (1981) : Les hommes fossiles de Qafzeh (Israël). Paris: Cahiers de Paléontologie (Paléoanthropologie). Editions du CNRS. 218 p.
- 310.** VANDERMEERSCH, B. (1982) : L'Homme de Biache-Saint-Vaast. Comparaison avec l'Homme de Tautavel. In *1er Congrès international de Paléontologie Humaine L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles*, ed. CNRS. Nice, 1982, pp. 894-900.
- 311.** VEKUA, A., LORDKIPANIDZE, D., RIGHTMIRE, G. P., AGUSTI, J., FERRING, R., MAISURADZE, G., MOUSKHELISHVILI, A., NIORADZE, M., PONCE de LEON, M., TAPPEN, M., TVALCHRELIDZE, M., ZOLLIKOFER, C. (2002) : A New Skull of Early Homo from Dmanisi, Georgia. *Science*, **297** : 85-89.
- 312.** VIALET, A. (2005) : La face supérieure et moyenne des hominidés fossiles depuis le Pléistocène inférieur récent. Thèse du Muséum National d'Histoire Naturelle. Institut de Paléontologie Humaine. Paris. 290 p.
- 313.** VIALET, A., LI, T., GRIMAUD-HERVE, D., LUMLEY, M.-A. de, LIAO, M., FENG, X. (2005) : Proposition de reconstitution du deuxième crâne d'*Homo erectus* de Yunxian (Chine). *C. R. Palevol*, **4** : 265-274.
- 314.** VIGNAL, J.-N. (2000a) : Détermination des épaisseurs de tissus mous en fonction du sexe, de l'âge et de la corpulence à partir de l'exploitation d'images tomодensitométriques. In ARTCOM' (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléoanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 323-331.
- 315.** VIGNAL, J.-N. (2000b) : Technique de reconstitution faciale par déformation d'image. In ARTCOM' (ed.): L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles

- technologies en Paléontologie humaine et en Paléoanthropologie. Paris: ANDRIEUX, P., HADJOUIS, D., DAMBRICOURT-MALASSE, A., pp. 332-341.
- 316.** VLCEK, E. (1986) : Les Anténéandertaliens en Europe Centrale et leur comparaison avec l'Homme de Tautavel. *L'Anthropologie*, **90** : 503 - 513.
- 317.** VOIGT, M., SCHAEFER, D. J., ANDREE, C. (2000) : Three-dimensional reconstruction of a defect of the frontozygomatic area by custom made Proplast II implant. *Eur J Plast Surg*, **23** : 391-394.
- 318.** VRBA, E. (1982) : Biostratigraphy and chronology, based particularly on *Bovidae*, of southern hominid-associated assemblages: Makapansgat, Sterkfontein, Taung, Kromdraai, Swartkrans; also Elandsfontein (Saldanha), Broken Hill (now Kabwe) and Cave of Hearsh. In Hd Lumley (ed.): *L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés fossiles*, 1^{er} Congrès International de Paléontologie humaine, pré tirage, pp. 707-752.
- 319.** WALKER, A. C., LEAKEY, R.E., HARRIS, J.M., BROWN, F.H. (1986) : 2.5-Myr Australopithecus boisei from West of Lake Turkana, Kenya. *Nature*, **322** : 517-522.
- 320.** WALKER, A., LEAKEY, R. (1993) : The Nariokotome Homo erectus Skeleton. WALKER, A., LEAKEY, R. (Eds) Berlin: Springer-Verlag. 458p.
- 321.** WANG, D. (1985) : Découvertes récentes de restes humains fossiles en Chine. *L'Anthropologie* (Paris), **89** : 135-139.
- 322.** WEBER, G. W. (2001) : Virtual Anthropology (VA): A Call for Glasnost in Paleoanthropology. *The Anatomical Record (New Anat.)*, **265** (4) : 193-201.
- 323.** WEBER, G. W. (2002) : Virtual Anthropology - The Hope for More Transparency in Paleoanthropology. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.): *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 63-66.
- 324.** WEBER, G. W., KIM, J., NEUMAIER, A., MAGORI, C. C., SAANANE, C. B., RECHEIS, W., SEIDLER, H. (2000) : Thickness Mapping of the Occipital Bone on CT-data - a New Approach Applied on OH9. *Acta Anthropologica Sinica*, **19 suppl** : 52-61.
- 325.** WEBER, G. W., SEIDLER, H., THACKEREY, F., BRAGA, J., TREIL, J., RECHEIS, W., NEDDEN, D. zur, CONROY, C. (2001) : CD ROM EDITION « FOSSIL HOMINIDS » Institute for Anthropology, University of Vienna. Transvaal Museum, Northern Flayship Institution. STS 71.
- 326.** WEBER, G. W., SEIDLER, H., THACKEREY, F., BRAGA, J., TREIL, J., RECHEIS, W., NEDDEN, D. zur, CONROY, C. (2002) : CD ROM EDITION « FOSSIL HOMINIDS » Institute for Anthropology, University of Vienna. Transvaal Museum, Northern Flayship Institution. STS 5 (Mrs Ples).
- 327.** WEBER, G. W., SEIDLER, H., MAGORY, C., SAANANE, C., KAMAMBA, D., THACKEREY, F., SCHRENK, F., RECHEIS, W., NEDDEN, D. zur, CONROY, C.

- (2003) : CD ROM EDITION «Digital@rchive FOSSIL HOMINIDS» Institute for Anthropology, University of Vienna. OH 9.
328. WEIDENREICH, F. (1947) : "Facts and Speculations concerning the Origin of *Homo sapiens*". *American Anthropologist*, **49**(2) : 187-203.
329. WHITE, D. D., FALK, D. (1999) : A quantitative and qualitative reanalysis of the endocast from the juvenile *Paranthropus* specimen L338y-6 from Omo, Ethiopia. *American Journal of Physical Anthropology*, **110** : 339-406.
330. WHITE, T. D., ASFAW, B., DeGUSTA, D., GILBERT, H., RICHARDS, G. D., SUWA, G., HOWELL, F. C. (2003) : Pleistocene *Homo sapiens* from Middle Awash, Ethiopia. *Nature*, **423** : 742-747.
331. WIDIANTO, H. (1993) : Unité et diversité des hominidés fossiles de Java: présentation de restes humains fossiles inédits. Thèse de doctorat du Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris. 284p.
332. WIDIANTO, H., ZEITOUN, V. (2003) : Morphological Description, Biometry and Phylogenetic Position of the Skull of Ngawi 1 (East Java, Indonesia). *International Journal of Osteoarchaeology*, **13** : 339-351.
333. WIND, J., ZONNEFELD, F. W. (1988) : Radiologie Moderne et Crânes Fossiles. In ERAUL (ed.): L'Homme de Neandertal. Vol 3. L'Anatomie. Liège: 1988, pp. 137-144.
334. WOLPOFF, M. H., HAWKS, J., CASPARI, R. (2000) : Multiregional, Not Multiple Origins. *American Journal of Physical Anthropology*, **112** : 129-136.
335. WOLPOFF, M. H., LEE, S.-H. (2001) : Les espèces humaines du Pléistocène supérieur d'Israël. *Bull. et Mém. de la Soc. d'Anthrop. de Paris*, n.s. **13** : 291-310.
336. WOOD, B.A. (1991) : Koobi Fora research project. Vol 4. Oxford: Clarendon Press, 1112p.
337. WOOD, B. A. (1992a) : Early hominid species and speciation. *Journal of Human Evolution*, **22** : 351-365.
338. WOOD, B. A. (1992b) : Origin and evolution of the genus *Homo*. *Nature*, **355** : 667-669.
339. WOOD, B., COLLARD, M. (1999a) : The Changing Face of Genus *Homo*. *Evolutionary Anthropology*, **8** (6) : 195 - 207.
340. WOOD, B., COLLARD, M. (1999b) : The Human Genus. *Science*, **284** : 65-71.
341. WOOD, B., RICHMOND, B. G. (2000) : Human evolution: taxonomy and paleobiology. *Journal of Anatomy*, **196** : 19-60.
342. WOODWARD, A. S. (1921) : A new cave man from Rhodesia, South Africa. *Nature*, **108** : 371-372.

343. WU, R., DONG, X. (1982) : Preliminary study of *Homo erectus* remains from Hexian, Anhui. *Acta Anthropologica Sinica*, **1** : 2-13.
344. WU, R., DONG, X. (1983) : Des fossiles d'*Homo erectus* découverts en Chine. *L'Anthropologie*, **87** : 177-183.
345. WU, X. (1981) : The well preserved cranium of an early *Homo sapiens* from Dali, Shaanxi. *Scientia Sinica*, **24** : 200-206.
346. WU, R. (1983) : Hominid fossils from China and their bearing on human evolution. *Canadian Journal of Anthropology/ Revue Canadienne d'Anthropologie*, **3** : 207-214.
347. YIN, G., FALGUERES, C., SHEN, G., LU, Y. (2001) : The age of Dali man, China. In XIVème congrès de l'UISPP. Chronology of southeast Asian Palaeolithic since the late *Homo erectus* period, Liège, 2-8 septembre pré-actes, pp. 353.
348. YOKOYAMA, Y., NGUYEN, H. V., FALGUERES, C., BIBRON, R., LEGER, C. (1991) : Datation directe par la spectrométrie gamma non destructive des restes humains: comparaison avec d'autres méthodes. In Datation et caractérisation des milieux Pléistocènes, ed. CNRS. Bordeaux: RAYNAL, J.-P., MIALLIER, D., 1991, pp. 11-17.
349. YOKOYAMA, Y., FALGUERES, C., LUMLEY, M.-A. de (1997) : Datation directe d'un crâne Proto-Cro-Magnon de Qafzeh par la spectrométrie gamma non destructive. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **324**, série IIa : 773-779.
350. ZEITOUN, V. (2000) : Révision de l'espèce *Homo erectus* (DUBOIS, 1893). *Société d'Anthropologie de Paris*, **12** : 1-200.
351. ZEITOUN, V. (2001) : The taxinomical position of the skull of Zuttiyeh. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la terre et des planètes*, **332** : 521 - 525.
352. Z'GRAGGEN, M., SCHIEL, H. J., KUNZ, C., LAMBRECHT, T. (2001) : Three-Dimensional Cephalometry Using Individual Skeletal Laser Technology Models. *Clinical Anatomy* **14**:258-268.
353. ZOLLIKOFER, C., PONCE de LEON, MS., MARTIN, RD. (1998) : Computer-assisted paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology*, **6** : 41-54.
354. ZOLLIKOFER, C. P. E., PONCE de LEON, M. S. (2000) : Computer-Assisted Paleoanthropology: Methods, Techniques and Applications. *Acta Anthropologica Sinica*, **19 suppl** : 90-97.
355. ZOLLIKOFER, C. P. E., PONCE de LEON, M. S. (2002a): Virtual Paleoanthropology: the 4th Dimension. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.): Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 47-53.

- 356.** ZOLLIKOFER, C. P. E., PONCE de LEON, M. S., VANDERMEERSCH, B., LEVEQUE, F. (2002b) : Evidence for interpersonal violence in the St Césaire Neanderthal. *PNAS*, **99** : 6444-6448.
- 357.** ZOLLIKOFER, C. P. E., PONCE de LEON, M. S., LIEBERMAN, D. E., GUY, F., PILBEAM, D., LIKIUS, A., MACKAYE, H. T., VIGNAUD, P., BRUNET, M. (2005) : Virtual cranial reconstruction of *Sahelanthropus tchadensis*. *Nature*, **234** : 755-759.
- 358.** ZONNEVELD, F. (2002) : Applications and Pitfalls of CT-Based 3-D Imaging of Hominid Fossils. In B MAFART, DELINGETTE, H. (ed.) : Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. Oxford: Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, pp. 5-9.
- 359.** ZONNEVELD, F. W., WIND, J. (1985) : High-Resolution Computed Tomography of Fossil Hominid Skulls: A New Method and Some Results. In PV TOBIAS (ed.): Hominid Evolution: Past, Present and Future. New York: LISS, A. R., Inc. p427-436.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE.....	7
INTRODUCTION.....	9
CHAP. I : ETAT DES CONNAISSANCES ANATOMIQUES, MORPHOMETRIQUES ET INFORMATIQUES.....	13
I.1 MORPHOLOGIE CRANIENNE DES DIFFERENTES ESPECES CONSIDEREES DANS LE GENRE HOMO	13
I.1.1 <i>Homo habilis</i> Leakey et al., 1964 / <i>Homo rudolfensis</i> Alexeev, 1986	13
I.1.2 <i>Homo ergaster</i> Groves et Mazák, 1975.....	14
I.1.3 <i>Homo erectus</i> <i>Pithecanthropus</i> Dubois, 1894 – <i>Sinanthropus</i> Black, 1927.....	14
I.1.4 <i>Homo georgicus</i> Gabunia et al., 2002.....	14
I.1.5 Les Anténéandertaliens	15
I.1.6 <i>Homo neanderthalensis</i> King, 1864	16
I.1.7 <i>Homo sapiens</i> Linnaeus, 1758.....	16
I.2 ACQUISITION DES CONNAISSANCES MORPHOMETRIQUES.....	17
I.2.1 Supports d'acquisition des données	17
I.2.1.1 Rayons X.....	17
I.2.1.2 Scanners	17
I.2.1.3 Appareils d'acquisition de données tridimensionnelles (digitaliseurs).....	17
I.2.2 Obtention des données pour l'étude des fossiles	18
I.2.2.1 Premières radiographies, étude des structures endocrâniennes.....	18
I.2.2.2 Scanners Computed tomography.....	18
I.2.3 Modélisation tridimensionnelle.....	19
I.2.3.1 Etude des structures internes et modélisation 3D du crâne.....	19
I.2.3.1.1 Etude de la structure interne de l'os	20
I.2.3.1.2 Etude de l'endocrâne	20
I.2.3.1.3 Calcul des volumes.....	21
I.2.3.1.4 Etude de l'oreille interne	22
I.2.3.1.5 Etude des sinus	24
I.2.3.1.6 Calcul des épaisseurs et de la surface crânienne.....	25
I.2.3.1.7 Matrice sédimentaire	25
I.2.3.2 Pathologies et Paléopathologies	26
I.2.3.3 Compensation des déformations et reconstructions virtuelles	26
I.2.3.4 Réalisation de stéréolithographies	28
I.2.4 Etudes Procustes et Morphométrie géométrique	29
I.3 OBJECTIFS.....	33
CHAP. II : MATERIELS PALEOANTHROPOLOGIQUES	35
II.1 LE CRANE ARAGO 21-47 DE TAUTAVEL ET SES DIFFERENTES RECONSTITUTIONS ANTERIEURES	35
II.1.1 <i>Historique des découvertes et définition du crâne Arago 21-47</i>	35
II.1.2 <i>Description des restes humains (Arago 21 – 47 – 47A – 3A – 3B – 78 - 79)</i>	36
II.1.2.1 Le massif facial Arago 21	36
II.1.2.2 Les os pariétaux Arago 47 – 47A – 3A – 3B	37
II.1.2.3 Les fragments occipitaux Arago 78 – 79.....	38
II.1.3 <i>Les précédentes reconstitutions et propositions concernant le crâne Arago 21-47</i>	38
II.1.3.1 Historique des reconstitutions et propositions.....	38
II.1.3.2 Particularités des précédentes reconstitutions	41
II.2 LES HOMINIDES FOSSILES DECOUVERTS A BIACHE-SAINT-VAAST	42
II.3 POPULATION ETUDIEE.....	44
II.3.1 <i>Hominidés fossiles originaux</i>	44
II.3.2 <i>Hominidés fossiles étudiés à partir de moulages</i>	47
CHAP. III : METHODES TRIDIMENSIONNELLES	61
III.1 METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES TRIDIMENSIONNELLES	61
III.1.1 <i>Scanner médical ou Tomodensitométrie à Rayons X</i>	61
III.1.1.1 Historique et principes.....	61
III.1.1.2 Acquisition des données tridimensionnelles par CT Scan	63
III.1.1.3 Exploitation des données et reconstruction virtuelle.....	64
III.1.1.3.1 Nombre de sommets délimitant le crâne à modéliser.....	65
III.1.1.3.2 Le rendu surfacique des modélisations	67
III.1.1.3.3 La notion de seuillage.....	68

III.1.2 Acquisition spatiale des points craniométriques au moyen d'un digitaliseur portable : MicroScribe®3DX.....	69
III.2 METHODES ANALYTIQUES ET MODELISATIONS TRIDIMENSIONNELLES	71
III.2.1 Difficulté du choix des points de repères (landmarks) craniométriques	71
III.2.2 Modélisation et liste des points de repères craniométriques.....	73
III.2.2.1 Définition des points de repères craniométriques utilisés.....	73
III.2.2.2 Modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques.....	75
III.2.2.3 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques ..	78
III.2.2.4 Modélisation tridimensionnelle de l'écaille frontale.....	81
III.2.2.5 Modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit	84
III.2.2.6 Symétrisation.....	87
III.2.3 Normalité de la population de référence	87
III.2.4 Méthodes Procrustes et ACP.....	88
III.2.4.1 Principe des Analyses Procrustes	88
III.2.4.2 Analyse en composante principale (ACP)	89
III.2.5 Les logiciels de modélisation virtuelle et d'analyse tridimensionnelle.....	91
III.2.5.1 Yav++.....	91
III.2.5.2 Mimics 8.0.....	92
III.2.5.3 RapidForm™2004.....	92
III.2.5.4 Morphologika	92
III.2.5.4.1 Format	92
III.2.5.4.2 Analyse Procuste	94
III.2.5.4.3 ACP.....	94
III.2.5.4.4 Thin-Plate Splines. Méthode des plaques minces ou TPS	97
CHAP. IV : NOUVELLE RECONSTRUCTION DU CRANE ARAGO 21-47 A PARTIR DE L'IMAGERIE TRIDIMENSIONNELLE : LA CHIMERE ARAGO3D.....	101
IV.1 RECONSTITUTION VIRTUELLE DE LA FACE ET DE LA VOUTE BIPARIETALE	101
IV.1.1 Fracturations et déformations post-mortem de la face Arago 21	101
IV.1.2 Corrections virtuelles des déformations post-mortem de la face Arago 21	103
IV.1.3 Mise en connexion virtuelle des fragments Arago 47, 47A et 3A sur la face Arago 21	106
IV.2 REALISATION D'UNE CHIMERE : ARAGO 3D.....	108
IV.2.1 Intégration d'un os occipital et d'os temporaux dans la reconstruction tridimensionnelle Arago 3D	109
IV.2.2 Intégration virtuelle des fragments occipitaux Arago 78 et Arago 79.....	114
IV.2.3 Finalisation de la chimère Arago3D	115
IV.3 RESULTATS ET COMPARAISONS DE NOTRE PROPOSITION DE RECONSTITUTION VIRTUELLE DU CRANE ARAGO3D	120
IV.3.1 Comparaison des faces des deux reconstitutions : Arago3D et Arago1981	120
IV.3.1.1 Différences anatomiques entre Arago3D et Arago1981	120
IV.3.1.2 Différences métriques entre Arago3D et Arago1981	121
IV.3.2 Comparaison des voûtes bipariétales des reconstitutions Arago3D et Arago1981	123
IV.3.2.1 Différences anatomiques entre la voûte bipariétale d'Arago3D et celle d'Arago1981	123
IV.3.2.2 Différences métriques entre la voûte bipariétale d'Arago3D et celle d'Arago1981	125
IV.3.3 Comparaison des reconstructions Arago3D et Arago1981 après intégration virtuelle de l'os occipital et des os temporaux prélevés sur Ceprano 1	126
IV.3.4 Modélisation tridimensionnelle des Complexes Segmentaires Inter Points.....	129
IV.3.5 Etude des plans de cassure du crâne Arago3D	130
IV.3.6 Comparaison virtuelle de la nouvelle chimère Arago3D avec d'autres Hominidés fossiles	131
IV.3.6.1 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Petralona.....	131
IV.3.6.2 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Kabwe.....	133
IV.3.6.3 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Bodo 1	134
IV.3.6.4 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec le crâne de Sima de los Huesos 5	136
IV.3.6.5 Comparaison virtuelle du crâne Arago3D avec la calotte crânienne de Ceprano 1	137
IV.3.6.6 Articulation virtuelle du crâne Arago3D avec l'hémi-mandibule droite Arago 13.....	139
CHAP. V : ETUDE PALEOANTHROPOLOGIQUE ET RECONSTRUCTION VIRTUELLE DU CRANE DE BIACHE-SAINT-VAAST 2.....	141
V.1 INVENTAIRE ET DESCRIPTIONS DES PIECES OSSEUSES ATTRIBUEES A BIACHE-SAINT-VAAST 2	141
V.1.1 L'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2	141
V.1.1.1 La face exocrânienne de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2.....	141
V.1.1.2 La face endocrânienne de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2.....	146
V.1.1.3 Proposition de nouvelle articulation des fragments de l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2	146

<i>V.1.2 L'os pariétal</i>	148
V.1.2.1 La face exocrânienne	148
V.1.2.2 La face endocrânienne	149
V.1.2.3 Présence d'un chignon occipital sur Biache-Saint-Vaast 2	152
V.1.2.4 Suggestion de modification de l'assemblage de l'os pariétal gauche de Biache-Saint-Vaast 2	152
<i>V.1.3 L'os temporal de Biache-Saint-Vaast 2</i>	153
<i>V.1.4 L'os sphénoïde gauche de Biache-Saint-Vaast 2</i>	154
<i>V.1.5 L'os occipital de Biache-Saint-Vaast 2</i>	154
V.2 AGE ET SEXE DE L'INDIVIDU BIACHE-SAINT-VAAST 2	156
V.3 POSITION CHRONOSTRATIGRAPHIQUE DE BIACHE-SAINT-VAAST 2	156
V.4 PROPOSITION DE RECONSTITUTION VIRTUELLE DE BIACHE-SAINT-VAAST 2	157
<i>V.4.1 Choix du spécimen de référence</i>	157
V.4.1.1 Comparaison des profils sagittaux frontaux	157
V.4.1.2 Comparaison des profils frontaux transversaux	160
V.4.1.3 Comparaison des profils pariéto-temporaux en coupe frontale	163
V.4.1.4 Comparaison des profils pariéto-temporaux en vue transversale	165
V.4.1.5 Comparaison de caractères morphologiques.....	168
V.4.1.6 Conclusions	169
<i>V.4.2 Proposition de reconstitution virtuelle de Biache-Saint-Vaast 2</i>	169
V.5 RESULTATS ET COMPARAISONS DE LA PROPOSITION DE RECONSTITUTION VIRTUELLE DE BIACHE-SAINT-VAAST 2, BSV 2	178
<i>V.5.1 Description anatomique de la reconstruction virtuelle BSV 2</i>	178
<i>V.5.2 Valeurs métriques relevées sur la chimère Biache-Saint-Vaast 2</i>	181
<i>V.5.3 Comparaison virtuelle de notre proposition de chimère de Biache-Saint-Vaast 2 avec d'autres crânes d'Hominidés fossiles</i>	184
V.5.3.1 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec le crâne de La Ferrassie 1	184
V.5.3.2 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec le crâne de Amud 1	186
V.5.3.3 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec le crâne de Sima de los Huesos 5	187
V.5.3.4 Comparaison virtuelle de notre chimère BSV 2 avec notre proposition de reconstruction du crâne Arago3D	188
<i>V.5.4 Définition des points de repères craniométriques utilisés pour modéliser BSV 2</i>	190
CHAP. VI. : RECONSTRUCTION VIRTUELLE COMPLEMENTAIRE : DMANISSI D2282*	193
VI.1 LE CRANE FOSSILE D2282 DE DMANISSI : RECONSTRUCTION VIRTUELLE D2282*	193
<i>VI.1.1 Etat du fossile D2282</i>	193
<i>VI.1.2 Proposition de reconstitution virtuelle de D2282* - Méthode</i>	196
VI.2 RESULTATS DE LA RECONSTITUTION VIRTUELLE DE D2282*	199
CHAP. VII : RESULTATS DES SUPERIMPOSITIONS PROCUSTES	205
VII.1 VARIATIONS TRIDIMENSIONNELLES DES GRANDS SINGES – AUSTRALOPITHEQUES – PARANTHROPES ET PREMIERS HOMO	207
<i>VII.1.1 Modélisation tridimensionnelle des crânes des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers Homo avec 24 points de repères craniométriques</i>	207
<i>VII.1.2 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers Homo avec 21 et 19 points de repères craniométriques</i>	209
<i>VII.1.3 Modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers Homo</i>	211
<i>VII.1.4 Modélisation tridimensionnelle du pariétal droit des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers Homo</i>	214
<i>VII.1.5 Modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des Grands Singes, Australopithèques, Paranthropes et premiers Homo</i>	216
VII.2 MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE DES ESPECES DU GENRE HOMO	218
<i>VII.2.1 Modélisation tridimensionnelle des crânes des espèces du genre Homo avec 24 points de repères craniométriques</i>	218
<i>VII.2.2 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne des espèces du genre Homo avec 21 points de repères craniométriques</i>	238
<i>VII.2.3 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne des espèces du genre Homo avec 19 points de repères craniométriques</i>	242
<i>VII.2.4 Modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale des espèces du genre Homo</i>	264
<i>VII.2.5 Modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit des espèces du genre Homo</i>	290
<i>VII.2.6 Modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des espèces du genre Homo</i>	306

VII.3 COMPARAISON DES MODELISATIONS TRIDIMENSIONNELLES DES ESPECES DU GENRE HOMO SANS LES HOMO SAPIENS HISTORIQUES NI LES PREMIERS HOMO	326
VII.3.1 Modélisation du crâne avec 24 points de repères craniométriques, sans Homo sapiens historiques ni premiers Homo	326
VII.3.2 Modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 19 points de repères craniométriques, sans Homo sapiens historiques ni premiers Homo	329
CHAP. VIII : DISCUSSION	333
VIII.1 RECONSTRUCTION DU CRANE ARAGO3D	333
VIII.1.1 La face restaurée Arago 21	333
VIII.1.2 Les os pariétaux Arago 47 – 47A – 3A	334
VIII.1.3 Intérêts et limites de l'utilisation de Ceprano 1 pour réaliser la chimère Arago3D	335
VIII.1.4 La chimère Arago3D et la chimère Arago1981	336
VIII.2 ANALYSE DE LA RECONSTRUCTION VIRTUELLE DE BIACHE-SAINT-VAAST 2	338
VIII.3 ANALYSE DE NOTRE PROPOSITION VIRTUELLE DU CRANE DE DMANISSI D2282*	342
VIII.4 POSITION PHYLETIQUE DES HOMINIDES RECONSTITUES : ARAGO3D, BIACHE-SAINT-VAAST 2 ET DMANISSI D2282*	343
VIII.4.1 Australopithecus africanus et premiers Homo	343
VIII.4.2 Homo georgicus, Homo ergaster et Homo erectus africain	345
VIII.4.3 Homo erectus asiatiques	347
VIII.4.4 Anténéandertaliens et Homo sapiens	350
VIII.4.4.1 Homo cepranensis	350
VIII.4.4.2 Homo heidelbergensis d'Europe et d'Afrique : réhabilitation des Homo rhodesiensis	352
VIII.4.4.3 Homo heidelbergensis d'Europe et Néandertaliens : Positions phylétiques d'Arago3D et de Biache-Saint-Vaast 2	356
VIII.4.4.4 Homo sapiens neanderthalensis ou Homo neanderthalensis : relations avec les Homo sapiens	358
VIII.5 PROPOSITION DE NOUVELLE DEFINITION DU TERME ANTENEANDERTALIEN	361
VIII.5.1 Définition originale (H. et M.-A. de LUMLEY, 1985)	361
VIII.5.2 Proposition de définition	362
VIII.6 PROPOSITIONS DE RELATIONS PHYLETIQUES AU SEIN DU GENRE HOMO	363
VIII.6.1 Modèle d'accrétion ancienne des Néandertaliens	368
VIII.6.2 Modèle d'accrétion récente des Néandertaliens	369
VIII.6.3 Modèle d'accrétion intermédiaire des Néandertaliens (figure 259)	371
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	373
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	377
TABLE DES MATIERES	407
TABLE DES ILLUSTRATIONS	411
ANNEXES	421
ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DES COUPES SCANNERS UTILISEES	423
ANNEXE 2 : LISTE DES SPECIMENS HISTORIQUES UTILISES LORS DES SUPERIMPOSITIONS PROCUSTES	425
A.2.1 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle du crâne	425
A.2.2 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne	425
A.2.3 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal	426
A.2.4 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé	427
ANNEXE 3 : TEST DE NORMALITE DE LA POPULATION HISTORIQUE	429
A.3.1 Mesure Bregma - Lambda	429
A.3.2 Mesure Stéphanion – Stéphanion	430
A.3.3 Mesure Sphénion – Sphénion	431
A.3.4 Mesure Largeur frontale minimale	432
A.3.5 Mesure Largeur bijugale	433
A.3.6 Mesure Largeur biastérique	434
A.3.7 Mesure Corde Nasion – Lambda	435
A.3.8 Mesure Corde Nasion – Opisthocranion	436
ANNEXE 4 : MESURES REALISEES SUR DIFFERENTS HOMINIDES	437
PUBLICATIONS	439

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des Figures

Figure 1 : Vue frontale du massif facial Arago 21.....	36
Figure 2 : Reconstitution Arago – Swanscombe 1981. Différentes vues ; A : de face ; B : profil droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : profil gauche ; F : inférieure.....	39
Figure 3 : Angulation postérieure de la voûte bipariétale sur la reconstitution Arago – Swanscombe 1981.....	41
Figure 4 : Convexité vers la droite de la suture sagittale de la reconstitution Arago – Swanscombe 1981.....	42
Figure 5: Situation géographique du site Biache-Saint-Vaast.....	43
Figure 6 : Reconstruction tridimensionnelle de la calotte crânienne de OH 9.....	45
Figure 7 : Reconstruction tridimensionnelle de la calotte crânienne de D2280.....	45
Figure 8 : Reconstruction tridimensionnelle du crâne de D2282.....	46
Figure 9 : Reconstruction tridimensionnelle du crâne de Bodo 1.....	46
Figure 10 : Principes du Scanner médical à rayonnement X.....	62
Figure 11 : Lien entre le nombre de coupes, leur taille et le rendu surfacique.....	64
Figure 12 : Distorsion extrême de la reconstruction tridimensionnelle du crâne de Skhul 5 (gauche) et reconstruction correcte (droite).....	64
Figure 13 : Difficulté du rendu d'un contour crânien. Le contour réel est en noir; les segments correspondent aux contours modélisés.....	65
Figure 14 : Rendu volumique des reconstitutions en fonction du nombre de sommets générés.....	66
Figure 15 : Différentes textures applicables aux reconstructions virtuelles (Yav++).	67
Figure 16 : Echelle de Hounsfield.....	68
Figure 17 : Différents niveaux de seuillage et rendus volumiques (crâne d' <i>Homo sapiens</i>).	68
Figure 18 : Exemple de mauvais seuillage (crâne de Sambungmacan 3).....	69
Figure 19 : MicroScribe®3DX.....	69
Figure 20 : Mouvements possibles du MicroScribe®3DX.....	70
Figure 21 : Exemple de " sous-modélisation ".....	71
Figure 22 : Exemple de " sur-modélisation ".....	72
Figure 23 : Exemple de points de repères possibles et utilisables.....	72
Figure 24 : Points de repères cranionétriques en projection latérale gauche.....	75
Figure 25 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques.....	77
Figure 26 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques.....	79
Figure 27 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal avec 13 points de repères craniométriques.....	82
Figure 28 : Complexe Segmentaire Inter Points correspondant à la modélisation de la voûte bipariétale avec 15 points de repères craniométriques.....	85
Figure 29 : Différentes étapes de la superimposition Procuste (d'après Bruner, 2003).	88
Figure 30 : A : Points de repères craniométriques ; B : Complexe Segmentaires Inter Points.....	93
Figure 31 : Superposition Procuste de Complexes Segmentaires Inter Points.....	94
Figure 32 : Exemple d'Analyse en Composantes Principales ; Modélisation de la calotte crânienne au moyen de 21 points de repères craniométriques.....	95
Figure 33 : Représentation de l'espace de Kendall pour des triangles et principe du traitement des données pour l'analyse et la représentation des spécimens (triangles) dans un plan euclidien tangent passant par la forme consensus (individu moyen) de la superimposition (d'après O'HIGGINS <i>et al.</i> , 1998 ; DETROIT, 2002).....	96
Figure 34 : Comparaison par la méthode des plaques minces de la modélisation tridimensionnelle en 24 points d'un crâne de Gorille avec celle d'un <i>Homo sapiens</i> historique.....	97
Figure 35: Grille de déformation TPS seule ; Vue latérale gauche et supérieure.....	98
Figure 36: Grilles de déformation réalisées avec Morphologika. A : Volume cubique de déformation ; B : Axes des différentes projections utilisées ; C : Projection frontale de la modélisation tridimensionnelle sans la grille de déformation ; D : Projection frontale de la grille de déformation ; E. Projection frontale de la modélisation tridimensionnelle avec la grille de déformation.....	99
Figure 37 : Vues tridimensionnelles d'Arago 21 ; A : frontale ; B : supérieure ; C : inférieure.....	102
Figure 38 : Orientation des pressions subies par Arago 21.....	103
Figure 39: Résultat de la symétrisation virtuelle de la face Arago 21 (vue sagittale et frontale).....	104

Figure 40: Position de la suture coronale de la face Arago 21 avant et après découpage et nouvelle articulation virtuelle des fragments de l'écaille frontale cérébrale.....	104
Figure 41 : Résultat de la correction de la face Arago 21. Différentes vues ; A : frontale ; B : profil droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : inférieure.	105
Figure 42 : Proposition de mouvement à appliquer au pariétal droit Arago 47.....	106
Figure 43 : Articulation virtuelle d'Arago 47.	106
Figure 44: Assemblage virtuel d'Arago 47A (à droite) avec Arago 3A.....	107
Figure 45: Arago3D après intégration virtuelle des fragments Arago 3A, 21, 47, 47A et du symétrique d'Arago 47. Différentes vues ; A : frontale ; B : profil droit ; C : supérieure.	108
Figure 46 : Superposition du profil sagittal de la reconstitution Arago3D (T) avec celui de : A/ Kabwe ; B/ Bodo 1 ; C/ Ceprano 1 (coupe parasagittale) ; D/ Petralona ; E/ Sima de los Huesos 5.....	111
Figure 47: Comparaison du frontal restauré d'Arago 21 et de Ceprano 1. Vues : A : frontale ; B : profil droit ; C : profil droit, coupe sagittale.	112
Figure 48 : Intégration virtuelle des os temporaux de Ceprano 1 sur notre proposition d'Arago 21-47 en vues : A : frontale ; B : profil droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : profil gauche ; F : inférieure.....	113
Figure 49 : Ajout de l'os occipital de Ceprano 1 à Arago 21-47. Différentes vues ; A : postérieure ; B : supérieure ; C : inférieure; D : profil gauche ; E : profil droit.....	114
Figure 50 : Arago 78 et 79 en position anatomique.	114
Figure 51 : Arago 78 – 79 en position anatomique et nouvelle proposition de crâne, Arago3D.....	115
Figure 52: Arago 3D en vue frontale.	116
Figure 53 : Arago3D en vue postérieure.	117
Figure 54: Arago3D en vue supérieure.	118
Figure 55 : Arago3D en vue inférieure.	118
Figure 56 : Arago3D, profil droit.	119
Figure 57 : Arago3D, profil gauche.	119
Figure 58 : Comparaison des deux reconstitutions d'Arago 21-47 (en noir, restauration de la face Arago3D) en vues : A : latérale droit ; B : de frontale ; C : inférieure ; D : supérieure.	121
Figure 59 : Comparaison des pariétaux droits des deux reconstitutions d'Arago 21-47 (crâne Arago1981 ; En bleu, position d'Arago 47 et 47A dans la reconstitution Arago3D). Différentes vues : A : frontale ; B : latérale droit ; C : postérieure ; D : supérieure ; E : latérale gauche ; F : inférieure.....	124
Figure 60 : Modélisation de la suture sagittale sur la nouvelle reconstitution Arago3D.....	124
Figure 61: Réduction de l'angulation sagittale pariétale entre la reconstruction Arago1981 à gauche et Arago3D à droite.	125
Figure 62 : Différentes vues de notre proposition de reconstruction Arago3D.....	127
Figure 63 : Différentes vues des deux reconstructions d' Arago 21-47 ; Gauche : Version dirigée par M.-A. de Lumley, Arago1981 ; Droite : Version personnelle, Arago3D.	129
Figure 64 : Axe des différentes cassures subies par les pariétaux d'Arago 21-47.	130
Figure 65 : Hypothèse de fracturation du bloc occipital – pariétal droit Arago 47.	131
Figure 66 : Superposition virtuelle du crâne de Petralona et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.....	132
Figure 67 : Superposition des profils crâniens de Petralona et de notre reconstruction Arago3D en vue supérieure, sagittale et frontale.	132
Figure 68 : Superposition virtuelle du crâne de Kabwe et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.....	133
Figure 69 : Superposition des profils crâniens de Kabwe (Broken Hill 1) et de notre reconstruction Arago3D en vue supérieure, sagittale et frontale.....	134
Figure 70 : Superposition virtuelle du crâne de Bodo 1 et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.....	134
Figure 71 : Superposition des profils crâniens de Bodo 1 et de notre reconstruction Arago3D en vue supérieure, sagittale et frontale.	135
Figure 72 : Superposition virtuelle du crâne de Sima de los Huesos 5 et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.....	136
Figure 73 : Superposition des profils crâniens de Sima de los Huesos 5 et de notre reconstruction d'Arago en vue supérieure, sagittale et frontale.	137
Figure 74 : Superposition virtuelle de la calotte crânienne de Ceprano 1 et de notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale.....	138
Figure 75 : Superposition des profils crâniens de Ceprano 1 et de notre reconstruction d'Arago en vue supérieure, sagittale et frontale.	138
Figure 76 : Intégration virtuelle de l'hémi-mandibule (noir) Arago 13 symétrisée, à notre proposition de chimère Arago3D en vue latérale droit et frontale.....	139

Figure 77 : Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vue antérieure ; Echelle : 10 mm.	142
Figure 78: Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vue supérieure ; Echelle : 10 mm.	142
Figure 79 : Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vue inférieure ; Echelle : 10 mm.	143
Figure 80: Biache-Saint-Vaast 2 ; Os frontal ; Vues latérales droite et gauche; Echelle : 10 mm.	143
Figure 81 : Zone vermiculée au niveau de l'arcade orbitaire droite de Biache-Saint-Vaast 2.	145
Figure 82: Modélisation virtuelle des cavités sinuses frontales de Biache-Saint-Vaast 2 ; Vue frontale.	146
Figure 83 : Mise en évidence de la mauvaise articulation des fragments frontaux de BSV 2 ; Traits : axes point fronto-malaire orbitaire interne – échancrure sus-orbitaire.	147
Figure 84 : Nouveau frontal de BSV 2 après reconstitution ; traits : axes point fronto-malaire orbitaire interne – échancrure sus-orbitaire.	147
Figure 85 : Superposition en transparence de l'os frontal original et de la portion droite remaniée.	148
Figure 86 : Bloc pariéto-temporosphénoïde gauche de BSV 2, vue supérieure (A), latérale (B) et torus angularis (C) ; En gris : fragments en position incertaine ; Echelle : 10 mm.	150
Figure 87 : BSV 2 ; Bloc pariéto-temporal-sphénoïde, vue endocrânienne ; En gris sur le bord antérieur : fragments en position incertaine ; Echelle : 10 mm.	151
Figure 88: Début de la dépression pré-lambdatique de Biache-Saint-Vaast 2.	152
Figure 89 : Bloc pariéto-temporal-sphénoïde de Biache-Saint-Vaast 2, vue inférieure. Fragments mal articulés.	153
Figure 90 : Os occipital de Biache-Saint-Vaast 2 ; Vue inférieure et supérieure ; Echelle : 10 mm.	155
Figure 91 : Superposition du profil sagittal frontal de Biache-Saint-Vaast 2 avec ceux (en noir) de 3 <i>Homo heidelbergensis</i> et de 6 <i>Homo neanderthalensis</i> . La ligne blanche correspond à l'alignement des nasions. Les deux traits sur le profil d'Arago 21 représentent le rayon de courbure du bourrelet sus-orbitaire. SldH5 correspond à Sima de los Huesos 5. Echelle 10 mm.	159
Figure 92 : Plan de coupe transversal utilisé.	160
Figure 93 : Coupes transversales des os frontaux de Biache-Saint-Vaast 2 et celles de 3 <i>Homo heidelbergensis</i> et de 7 <i>Homo neanderthalensis</i> . Les deux traits sur le profil de BSV 2 représentent le rayon de courbure de la facette temporale du frontal. SldH5 correspond à Sima de los Huesos 5. Echelle 10 mm.	162
Figure 94 : Plan de coupe du bloc pariéto-temporal de BSV 2 de la mastoïde à l'incisure pariétale.	163
Figure 95 : Superposition du profil du bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 en vue frontale avec ceux (en noir) de 2 <i>Homo heidelbergensis</i> et de 6 <i>Homo neanderthalensis</i> et Biache-Saint-Vaast 1 (BSV 1). Les coupes suivent l'axe processus mastoïdien – incisure pariétale. BSV 1, coté droit. SldH5 correspond à Sima de los Huesos 5. Echelle 10 mm.	164
Figure 96 : Plan de coupe transversal du bloc pariéto-temporal de BSV 2. Axe astérion - kryptaphion.	166
Figure 97 : Superposition des profils transversaux du bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 avec ceux (en noir) de 2 <i>Homo heidelbergensis</i> et de 6 <i>Homo neanderthalensis</i> et Biache-Saint-Vaast 1 (BSV 1). Coupe suivant l'axe astérion – kryptaphion. SldH5 correspond à Sima de los Huesos 5. Echelle 10 mm.	167
Figure 98: Nouveau positionnement virtuel des extrémités antérieures du bloc pariéto-temporal de Biache-Saint-Vaast 2 ; P : Pariétal ; S : Sphénoïde.	170
Figure 99: Superposition virtuelle du crâne de Krapina 3 (bleu) et du frontal de BSV 2 en vues latérale gauche et de face.	170
Figure 100 : Os frontal et bloc pariéto-temporal de BSV 2 en position anatomique.	171
Figure 101 : Deux vues inférieures du frontal et du bloc pariéto-temporal de BSV 2.	171
Figure 102: Modélisation virtuelle de Biache-Saint-Vaast 1 avant et après symétrisation du coté droit.	172
Figure 103: Intégration du bloc pariéto-temporo-occipital de BSV1 au bloc pariéto-temporal-sphénoïde de BSV 2.	172
Figure 104 : Deux vues supérieures de la chimère BSV 2 en cours de réalisation, avec et sans l'occipital modifié de BSV 1.	173
Figure 105 : Déformation virtuelle des polygones, utilisée pour intégrer le bloc maxillo-malaire de la Ferrassie 1.	174
Figure 106 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue frontale.	175
Figure 107 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue postérieure.	176
Figure 108 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue inférieure.	176
Figure 109 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue supérieure.	177
Figure 110 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue latérale gauche.	177
Figure 111 : Reconstruction virtuelle du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 en vue latérale droit.	178
Figure 112 : Différentes vues virtuelles des fragments de Biache-Saint-Vaast 2 avec symétrisation du bloc pariéto-temporal gauche.	179
Figure 113 : Différentes vues de la chimère virtuelle Biache-Saint-Vaast 2.	180
Figure 114 : Zone de la suture coronale de Biache-Saint-Vaast 2, vue supérieure.	181
Figure 115 : Début de la dépression pré-lambdatique.	181

Figure 116 : Superposition virtuelle de la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 et de celui de La Ferrassie 1, vue latérale.	184
Figure 117 : Superposition du contour sagittal et frontal de Biache-Saint-Vaast 2 et La Ferrassie 1; Coupe frontale entre les porions et les mastoïdes.	185
Figure 118 : Superposition des contours de Biache-Saint-Vaast 2 et La Ferrassie 1 en vue supérieure ; Coupe transversale parallèle au plan de Francfort.	185
Figure 119 : Superposition des profils crâniens de Amud 1 et de notre proposition de reconstruction de BSV 2 en vue supérieure, sagittale et frontale.	186
Figure 120 : Superposition virtuelle de la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 et du crâne de Sima de los Huesos 5, vue latérale.	187
Figure 121 : Superposition des profils crâniens de Sima de los Huesos 5 et de notre chimère de BSV 2 en vue supérieure, sagittale et frontale.	188
Figure 122 : Superposition virtuelle de la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2 et de celui d'Arago3D, vue latérale.	189
Figure 123 : Superposition des profils crâniens des chimères Arago3D et de Biache-Saint-Vaast 2 en vue supérieure, sagittale et frontale.	189
Figure 124 : Points de repères craniométriques définissant la chimère du crâne de Biache-Saint-Vaast 2.	191
Figure 125 : Modélisation tridimensionnelle du crâne Dmanissi D2282.	193
Figure 126 : Différences de positionnement des os temporaux droits des individus D2280 (gauche) et D2282 (droite).	194
Figure 127 : Modélisation de l'axe biporionique chez D2282 (gauche), D2280 (centre), KNM-ER 3733 (droite).	195
Figure 128 : Modélisation des axes sagittaux de la calotte crânienne et du maxillaire de D2282 (gauche) et modélisation de l'axe des rochers de D2282 (centre) et de D2280 (droite).	195
Figure 129 : D2282 après isolement virtuel des différents fragments crâniens, vue de face.	196
Figure 130 : Repositionnement virtuel de l'écaille frontale de D2282*.	197
Figure 131 : Intégration virtuelle de l'os temporal et de l'os malaire gauche sur la proposition de reconstruction de D2282* puis les os correspondant sur le bord droit.	197
Figure 132 : Superposition virtuelle de notre proposition de D2282* et du crâne de KNM-ER 3733 suivant le plan de Francfort.	198
Figure 133 : Proposition de reconstruction pour D2282* après insertion du maxillaire.	199
Figure 134 : Modélisation de l'axe biporionique sur notre proposition de reconstruction virtuelle du crâne D2282*.	199
Figure 135 : Vue de profil gauche de D2700 – D2282 – D2280 de Vékua <i>et al.</i> (2002) avec inclusion de notre proposition de reconstruction D2282* (couleur).	200
Figure 136 : Proposition de reconstruction virtuelle de D2282* (gauche) et superposition de notre proposition et de l'original (droite ; original en noir).	200
Figure 137 : Superposition virtuelle du crâne de KNM-WT 15000 et de notre proposition de reconstruction de D2282*, en plein et en transparence.	201
Figure 138 : Superpositions virtuelles du crâne de KNM-ER 3733 avec celui de D2282* et avec la calotte crânienne de D2280 en vue latérale.	202
Figure 139 : Axe principal des pressions exercées sur le crâne de Dmanissi D2282* (flèche rouge) et mouvements des os temporaux (blanc) et malaires (gris).	202
Figure 140 : Analyse en Composantes Principales des crânes de tous les spécimens modélisés tridimensionnellement avec 24 points de repères craniométriques.	206
Figure 141 : Analyse en Composantes Principales des crânes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> . Modélisation tridimensionnelle avec 24 points de repères.	208
Figure 142 : Analyse en Composantes Principales des calottes crâniennes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> . Modélisation tridimensionnelle avec 19 points de repères craniométriques.	210
Figure 143 : Analyse en Composantes Principales de la voûte bipariétale des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> . Modélisation tridimensionnelle avec 15 points de repères craniométriques.	212
Figure 144 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle du pariétal droit des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> .	214
Figure 145 : Analyse en Composantes Principales du frontal des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> . Modélisation tridimensionnelle avec 13 points de repères craniométriques.	216
Figure 146 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle du crâne du genre <i>Homo</i> avec 24 points de repères craniométriques.	218
Figure 147 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle du crâne du genre <i>Homo</i> avec 24 points de repères craniométriques ; Noms des individus ; D2282* correspond à une version modifiée virtuellement de D2282.	219

Figure 148 : Comparaison tridimensionnelle des crânes de KNM-ER 1470 et de KNM-ER 3733 en TPS.....	222
Figure 149 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 1470 et de Sangiran 17 en TPS.....	222
Figure 150 : Comparaison tridimensionnelle des crânes de KNM-ER 1470 et de D2282 en TPS.	223
Figure 151 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de D2282 – KNM-ER 3733 en TPS.	224
Figure 152 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de D2282 et de Sangiran 17 en TPS.	225
Figure 153 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et Arago3D-Sdlh5 en TPS.....	226
Figure 154 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Petralona-Kabwe en TPS.....	226
Figure 155 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et de Sangiran 17 en TPS.....	227
Figure 156 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de KNM-ER 3733 et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	228
Figure 157 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes d' <i>Homo sapiens</i> préhistoriques et historiques en TPS.	229
Figure 158 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et Petralona-Kabwe en TPS.....	230
Figure 159 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et de Sangiran 17 en TPS.....	231
Figure 160 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et d' <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.....	232
Figure 161 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Arago3D-Sdlh5 et d' <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	232
Figure 162 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Petralona-Kabwe – Sangiran 17 en TPS.....	233
Figure 163 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Petralona-Kabwe et d' <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.....	234
Figure 164 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Petralona-Kabwe et d' <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	235
Figure 165 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes de Sangiran 17 et d' <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	236
Figure 166 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des crânes d' <i>Homo neanderthalensis</i> et d' <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	237
Figure 167 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 21 points de repères craniométriques.	238
Figure 168 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 21 points de repères craniométriques ; Noms des individus.....	239
Figure 169 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 21 points de repères craniométriques ; Noms des individus - bis.....	240
Figure 170 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 19 points de repères craniométriques.	242
Figure 171 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 19 points craniométriques ; Noms des individus.....	243
Figure 172 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 19 points craniométriques ; Noms des individus - bis.....	244
Figure 173 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo ergaster</i> en TPS.....	247
Figure 174 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	248
Figure 175 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers <i>Homo</i> et d' <i>Homo cepranensis</i> en TPS.....	249
Figure 176 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers <i>Homo</i> et d'Arago3D-Sdlh5 en TPS.	250
Figure 177 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des premiers <i>Homo</i> et de Petralona-Kabwe en TPS.	250
Figure 178 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de <i>Homo ergaster</i> et d' <i>Homo cepranensis</i> en TPS.....	251

Figure 179 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de <i>Homo ergaster</i> et d'Arago3D-Sdlh5 en TPS.	252
Figure 180 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des <i>Homo ergaster</i> et de Petralona-Kabwe en TPS.	253
Figure 181 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	253
Figure 182 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	254
Figure 183 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de <i>Homo sapiens</i> préhistoriques et historiques en TPS.	255
Figure 184 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	256
Figure 185 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et de Petralona-Kabwe en TPS.	257
Figure 186 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	257
Figure 187 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	258
Figure 188 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Arago3D-Sdlh5 et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	259
Figure 189 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Petralona-Kabwe et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	260
Figure 190 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Petralona-Kabwe et des Néandertaliens en TPS.	261
Figure 191 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de Petralona-Kabwe et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	261
Figure 192 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes de <i>Homo erectus</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	262
Figure 193 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des calottes crâniennes des <i>Homo neanderthalensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	263
Figure 194 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale pour le genre <i>Homo</i> .	264
Figure 195 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale pour le genre <i>Homo</i> ; Nom des individus.	266
Figure 196 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation de la voûte bipariétale pour le genre <i>Homo</i> ; Nom des individus - bis.	267
Figure 197 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo ergaster</i> en TPS.	270
Figure 198 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo georgicus</i> en TPS.	272
Figure 199 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo ergaster</i> et de <i>Homo cepranensis</i> en TPS.	273
Figure 200 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo heidelbergensis</i> en TPS.	274
Figure 201 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	275
Figure 202 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	276
Figure 203 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	277
Figure 204 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques et des <i>Homo sapiens</i> historiques en TPS.	278
Figure 205 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo georgicus</i> et d' <i>Homo cepranensis</i> en TPS.	279
Figure 206 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo georgicus</i> et des <i>Homo heidelbergensis</i> en TPS.	280
Figure 207 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo georgicus</i> et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	281
Figure 208 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale de <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo heidelbergensis</i> en TPS.	282

Figure 209 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale de <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.....	283
Figure 210 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale de <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	284
Figure 211 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo heidelbergensis</i> et des <i>Homo erectus</i> en TPS.....	285
Figure 212 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo heidelbergensis</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	286
Figure 213 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo heidelbergensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.....	287
Figure 214 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo erectus</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.....	288
Figure 215 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles de la voûte bipariétale des <i>Homo neanderthalensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.....	289
Figure 216 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit du genre <i>Homo</i>	290
Figure 217 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit du genre <i>Homo</i> ; Noms des individus.	291
Figure 218 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit du genre <i>Homo</i> ; Noms des individus - bis.	292
Figure 219 : Modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit; Projections dans le plan sagittal, frontal et transversal.	295
Figure 220 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo ergaster</i> en TPS.....	296
Figure 221 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo georgicus</i> en TPS.	297
Figure 222 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo cepranensis</i> en TPS.	298
Figure 223 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo heidelbergensis</i> en TPS.	299
Figure 224 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits d' <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo heidelbergensis</i> en TPS.	300
Figure 225 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits d' <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.....	300
Figure 226 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits d' <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.....	301
Figure 227 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques et des <i>Homo sapiens</i> historiques en TPS.	302
Figure 228 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des <i>Homo heidelbergensis</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.....	303
Figure 229 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits des <i>Homo heidelbergensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	304
Figure 230 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des pariétaux droits de <i>Homo neanderthalensis</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.....	305
Figure 231 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal du genre <i>Homo</i>	306
Figure 232 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal du genre <i>Homo</i> ; Noms des individus fossiles.	307
Figure 233 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal du genre <i>Homo</i> ; Noms des individus fossiles - bis.	308
Figure 234 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo georgicus</i> en TPS.	311
Figure 235 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des premiers <i>Homo</i> et des <i>Homo ergaster</i> en TPS.....	312
Figure 236 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de <i>Homo georgicus</i> et des <i>Homo ergaster</i> en TPS.....	312
Figure 237 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de <i>Homo ergaster</i> et d' <i>Homo cepranensis</i> en TPS.....	313
Figure 238 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des <i>Homo ergaster</i> et d'Arago3D-Sdlh5 en TPS.	314

Figure 239 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des <i>Homo ergaster</i> et de Petralona-Bodo1-Kabwe en TPS.	315
Figure 240 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	315
Figure 241 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des <i>Homo ergaster</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	316
Figure 242 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques et des <i>Homo sapiens</i> historiques en TPS.	317
Figure 243 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d' <i>Homo cepranensis</i> et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	318
Figure 244 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et de Petralona-Bodo1-Kabwe en TPS.	319
Figure 245 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	319
Figure 246 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	320
Figure 247 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux d'Arago3D-Sdlh5 et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	321
Figure 248 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de Petralona-Bodo1-Kabwe et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	322
Figure 249 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de Petralona-Bodo1-Kabwe et des <i>Homo neanderthalensis</i> en TPS.	322
Figure 250 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux de Petralona-Bodo1-Kabwe et des <i>Homo erectus</i> en TPS.	323
Figure 251 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux des <i>Homo erectus</i> et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	324
Figure 252 : Comparaison des modélisations tridimensionnelles des os frontaux Néandertaliens et des <i>Homo sapiens</i> préhistoriques en TPS.	325
Figure 253 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelles du crâne d'individus du genre <i>Homo</i> avec 24 points de repères craniométriques, sans <i>Homo sapiens</i> historiques ni premiers <i>Homo</i> ; D2282* correspond à une version modifiée virtuellement de D2282.	327
Figure 254 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne de spécimens du genre <i>Homo</i> en 19 points de repères craniométriques, sans <i>Homo sapiens</i> historiques ni premiers <i>Homo</i>	329
Figure 255 : Analyse en Composantes Principales de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne de spécimens du genre <i>Homo</i> en 19 points de repères craniométriques, sans <i>Homo sapiens</i> historiques ni premiers <i>Homo</i> ; Noms des spécimens.	331
Figure 256 : Evolution des Complexes Segmentaires Inter Points des Hominidés en projection sagittale.	364
Figure 257 : Evolution des Complexes Segmentaires Inter Points des Hominidés en projection frontale.	365
Figure 258 : Evolution des Complexes Segmentaires Inter Points des Hominidés en projection transversale.	366
Figure 259 : Proposition de relations phylétiques fondée sur la chronologie, la localisation géographique et la conformation tridimensionnelle des individus du genre <i>Homo</i> , du Pléistocène ancien inférieur jusqu'à l'Holocène.	372

Liste des Tableaux

Tableau 1a : Liste des Hominidés fossiles originaux étudiés.b/ à partir de scanners à rayonnement X.	44
Tableau 2 : Liste des points de repères craniométriques utilisés.	73
Tableau 3 : Points de repères craniométriques utilisés lors de la modélisation tridimensionnelle du crâne.	76
Tableau 4 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques.	78
Tableau 5 : Points de repères craniométriques utilisés lors de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points.	79
Tableau 6 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques (19 points uniquement).	80
Tableau 7 : Points de repères craniométriques utilisés lors de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal.	81
Tableau 8 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal.	83

Tableau 9 : Points de repères craniométriques utilisés dans la modélisation de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé.	84
Tableau 10 : Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé (pariétal droit uniquement).	86
Tableau 11 : Format d'un fichier au format Morphologika.	93
Tableau 12 : Symboles utilisés pour désigner les différents spécimens dans le cadre des ACP.	96
Tableau 13 : Mesures virtuelles réalisées sur la face des reconstitutions Arago3D et Arago1981 (points craniométriques selon Martin <i>et al.</i> , 1957).	123
Tableau 14 : Mesures virtuelles réalisées sur la face et la voûte bipariétale des reconstitutions Arago3D et Arago1981 (points craniométriques selon Martin <i>et al.</i> , 1957).	126
Tableau 15 : Mesures virtuelles du bloc temporo-occipital relevées sur les deux reconstitutions, Arago3D et Arago1981 (points craniométriques selon Martin <i>et al.</i> , 1957).	128
Tableau 16 : Nouvelles mesures relevées sur l'os frontal de Biache-Saint-Vaast 2.	148
Tableau 17 : Quelques mesures prises sur les fragments de Biache-Saint-Vaast 2 en mm.	155
Tableau 18 : Liste des fossiles comparés avec Biache-Saint-Vaast 2.	157
Tableau 19 : Liste des caractères morphologiques étudiés (1 : comme BSV 2 ; 0 : différent ; / : non comparable).	168
Tableau 20 : Mesures virtuelles réalisées sur notre proposition de chimère de Biache-Saint-Vaast 2 (points craniométriques selon Martin <i>et al.</i> , 1957).	182
Tableau 21 : Valeurs morphométriques de notre reconstruction D2282* différant de l'original.	203

Liste des Graphiques

Graphique 1 : Mesures craniométriques relevées sur la reconstruction de Biache-Saint-Vaast 2 comparées à Arago et aux Néandertaliens.	183
Graphique 2 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle du crâne de tous les spécimens étudiés, avec 24 points de repères craniométriques.	207
Graphique 3 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle des crânes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> avec 24 points de repères craniométriques.	209
Graphique 4 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle des calottes crâniennes des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i> avec 19 points craniométriques.	211
Graphique 5 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i>	213
Graphique 6 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de l'os pariétal droit des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i>	215
Graphique 7: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal des Grands Singes – Australopithèques – Paranthropes et premiers <i>Homo</i>	217
Graphique 8: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle des crânes du genre <i>Homo</i> avec 24 points de repères craniométriques.	221
Graphique 9: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 21 points de repères craniométriques.	241
Graphique 10: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne du genre <i>Homo</i> avec 19 points craniométriques.	246
Graphique 11: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale du genre <i>Homo</i>	270
Graphique 12 : Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle du pariétal droit du genre <i>Homo</i>	295
Graphique 13: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal dans le genre <i>Homo</i>	310
Graphique 14: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle du crâne avec 24 points de repères craniométriques, d'individus du genre <i>Homo</i> , sans <i>Homo sapiens</i> historiques ni premiers <i>Homo</i>	328

Graphique 15: Importance des 10 premières composantes sur la variance totale, dans le cadre de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne en 19 points de repères craniométriques, sans <i>Homo sapiens</i> historiques ni premiers <i>Homo</i>	331
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques des coupes scanners utilisées

Tableau A1 : Caractéristiques des coupes scanners utilisées.

Fossiles	Espace entre les pixels (mm) <i>Pixel Spacing</i>	Epaisseur des coupes (mm) <i>Slice Thickness</i>	Ecart réel (mm)	Mode	Source
Amud 1	0,570312	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Arago 3	0,1875	0,625	0,4	Helical Mode	Original
Arago 13	0,253906	1	1	Helical Mode	Original
Arago 21	0,292969	1	1	Helical Mode	Original
Arago 47	0,292969	1	1	Helical Mode	Original
Arago 47a	0,1875	0,625	0,4	Helical Mode	Original
Arago 78	0,1875	0,625	0,4	Helical Mode	Original
Arago 79	0,1875	0,625	0,4	Helical Mode	Original
Bodo	0,49023	1	1	Helical Mode	Original
BSV 1	0,431641	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
BSV 2	0,326172	0,625	0,4	Helical Mode	Original
Broken Hill 1	0,443359	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Ceprano 1	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
La Chapelle	0,542969	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Chimpanzé femelle 1	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Original
Chimpanzé femelle 2	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Chimpanzé male	0,460938	1,25	0,625	Helical Mode	Original
Circeo 1	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Zhoukoudian XI	0,464844	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Cova Negra	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Cro-Magnon 1	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
D2280	0,449219	1	1	Helical Mode	Original
D2282	0,449219	1	1	Helical Mode	Original
La Ferrassie 1	0,564453	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Gorille	0,640625	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
KNM-WT 15000	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
KNM-ER 1470	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
KNM-ER 1813	0,337891	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
KNM-ER 3733	0,423828	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
KNM-ER 23000	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Krapina 3	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
La Quina H5	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
<i>Homo sapiens</i> historiques (4 Hommes et 5 Femmes)	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Originaux
Neandertal	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Ngawi 1	0,375	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
OH 5	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
OH 9	0,466797	1	1	Helical Mode	Original
Pataud	0,402344	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage

Petralona	0,390625	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Qafzeh 9	0,558594	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Sambungmacan 3	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Sangiran 17	0,46875	1	1	Helical Mode	Moulage
Sima de los Huesos 5	0,488281	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Skhul 5	0,617188	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Ngandong 9	0,410156	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage
Sts 5	0,390625	1	1	Helical Mode	Original
Sts 71	0,390625	1	1	Helical Mode	Original
Swanscombe	0,458984	1,25	0,625	Helical Mode	Moulage

Annexe 2 : Liste des Spécimens Historiques Utilisés lors des Superimpositions Procustes

A.2.1 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle du crâne

Tableau A2: Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle du crâne.

<i>Homo sapiens</i> historiques	-OSP45 / OSP298 / OSP321 / OSP333 / OSP429 -FR22 / FR27 / FR31 / FR35 / FR50 / FRT49 / FRT44 -LaGayBT9 / LaGayBT28 / LaGayBT39 -NDB5 / NDB9A / NDB10 / NDB12 / NDB13 / NDB17 / NDB48 / NDB55(2) / NDB88 / NDDi116 / NDB130 / NDB133 / NDB134 / NDB174 / NDB187 / NDB223RHA / NDB225 / NDB268 / NDB293E / NDB293F / NDB293G / NDB293K / NDB293L / NDB305RHA / NDB305RHB / NDB319 / NDB338 / NDB339 / NDB346 / NDB351RHA / NDB362 / NDB372 / NDB378 / NDB383 / NDB385 / NDB388 / NDB395 / NDB397 / NDB398 / NDB432 / NDB444 / NDB448 / NDB452A / NDB477 / NDB494 / NDB518 / NDB553 / NDB582 / NDB635 / NDB657 / NDB658 / NDB659 / NDB1095 / NDB1099A / NDB1121 / NDB1296 / NDB1342 / NDB1462 / NDB1500
74	

A.2.2 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne

Tableau A3: Liste des spécimens étudiés lors de la modélisation tridimensionnelle de la calotte crânienne avec 21 et 19 points de repères craniométriques.

<i>Homo sapiens</i> historiques	-OSP45 / OSP298 / OSP321 / OSP333 / OSP429 -FR22 / FR27 / FR31 / FR35 / FR50 / FRT49 / FRT44 -LaGayBT9 / LaGayBT28 / LaGayBT39 -NDB5 / NDB9A / NDB10 / NDB12 / NDB13 / NDB17 / NDB48 / NDB52 / NDB55(2) / NDDi61 / NDDi67 / NDB71 / NDB73 / NDB88 / NDDi116 / NDDi129 / NDB130 / NDB133 / NDB134 / NDB138 / NDB174 / NDB185 / NDB187 / NDB205 / NDB205RHx / NDB206 / NDB215 / NDB223RHA / NDB223RHB / NDB223RHC / NDB223RHD / NDB224 / NDB225 / NDB230 / NDB260 / NDB268 / NDB274 / NDB293A / NDB293B / NDB293E / NDB293F / NDB293G / NDB293K / NDB293L / NDB305RHA / NDB305RHB / NDB319 / NDB320 / NDB338 / NDB339 / NDB346 / NDB351RHA / NDB353 / NDB362 / NDB372 / NDB378 / NDB383 / NDB385 / NDB388 / NDB392 / NDB395 / NDB397 / NDB398 / NDB424 / NDB432 / NDB440 / NDB444 / NDB448 / NDB452A / NDB453 / NDB462 / NDB477 / NDB494 / NDB501B / NDB518 / NDB545 / NDB553 / NDB561 / NDB578A / NDB582 / NDB635 / NDB657 / NDB658 / NDB659 / NDB1095 / NDB1099A / NDB1121 / NDB1296 / NDB1342 / NDB1462 / NDB1500
106	

A.2.3 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal

Tableau A4: Liste des spécimens étudiés pour la modélisation tridimensionnelle de l'os frontal.

<i>Homo sapiens</i> historiques	-OSP45 / OSP298 / OSP321 / OSP429 -FR22 / FR27 / FR31 / FR35 / FR50 / FRT44 / FRT49 -LaGayBT9 / LaGayBT28 / LaGayBT39
123	-NDB5 / NDB9A / NDB10 / NDB12 / NDB13 / NDB17 / NDB34 / NDB45 / NDB48 / NDB52 / NDB55A / NDB55(2) / NDDi61/ NDDi67 / NDB71 / NDB73 / NDB88 / NDDi116 / NDB121 / NDB 124 / NDDi129 / NDB130 / NDB133 / NDB134 / NDB138 / NDB146RHA / NDB161A / NDB161RHB / NDB174 / NDB179 / NDB185 / NDB187 / NDB205 / NDB205RHXe / NDB206 / NDB213 / NDB215 / NDB223RHA / NDB223RHB / NDB223RHC / NDB223RHD / NDB224 / NDB225 / NDB230 / NDB260 / NDB268 / NDB274 / NDB293A / NDB293B / NDB293E / NDB293F / NDB293G / NDB293K / NDB293L / NDB297 / NDB305RHA / NDB305RHB / NDB319 / NDB320 / NDB338 / NDB339 / NDB346 / NDB348 / NDB351RHA / NDB353 / NDB362 / NDB372 / NDB378 / NDB383 / NDB385 / NDB388 / NDB392 / NDB395 / NDB397 / NDB398 / NDB423 / NDB424 / NDB425 / NDB426 / NDB432 / NDB440 / NDB444 / NDB448 / NDB452A / NDB453 / NDB462 / NDB477 / NDB494 / NDB501B / NDB518 / NDB545 / NDB553 / NDB561 / NDB578A / NDB582 / NDB612 / NDB616 / NDB635 / NDB657 / NDB658 / NDB659 / NDB1095 / NDB1099A / NDB1121 / NDB1296 / NDB1342 / NDB1462 / NDB1500

A.2.4 Spécimens utilisés pour la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé

Tableau A5: Liste des spécimens étudiés pour la modélisation tridimensionnelle de la voûte bipariétale et du pariétal droit isolé (uniquement le pariétal droit).

<i>Homo sapiens</i> historiques	-OSP45 / OSP298 / OSP321 / OSP429 -FR27 / FR31 / FR35 / FR50 / FRT49 / FRT44 -LaGayBT9 / LaGayBT28 / LaGayBT39
109	-NDB5 / NDB9A / NDB10 / NDB12 / NDB13 / NDB17 / NDB45 / NDB48 / NDB52 / NDB55(2) / NDDi61/ NDDi67 / NDB71 / NDB73 / NDB107A / NDDi116 / NDB121 / NDDi129 / NDB130 / NDB133 / NDB134 / NDB138 / NDB161A / NDB174 / NDB185/ NDB187 / NDB196RHXc / NDB205 / NDB205RHXe / NDB206 / NDB215 / NDB223RHA / NDB223RHB / NDB223RHC / NDB223RHD / NDB224 / NDB225 / NDB230 / NDB260 / NDB268 / NDB274 / NDB293A / NDB293B / NDB293E / NDB293F / NDB293G / NDB293K / NDB293L / NDB305RHA / NDB305RHB / NDB315 / NDB319 / NDB320 / NDB338 / NDB339 / NDB346 / NDB351RHA / NDB353 / NDB362 / NDB372 / NDB378 / NDB383 / NDB385 / NDB388 / NDB392 / NDB395 / NDB397 / NDB398 / NDB424 / NDB432 / NDB440 / NDB444 / NDB448 / NDB452A / NDB453 / NDB462 / NDB477 / NDB494 / NDB501B / NDB518 / NDB545 / NDB553 / NDB561 / NDB578A / NDB582 / NDB635 / NDB657 / NDB658 / NDB659 / NDB1095 / NDB1099A / NDB1121 / NDB1296 / NDB1342 / NDB1462 / NDB1500

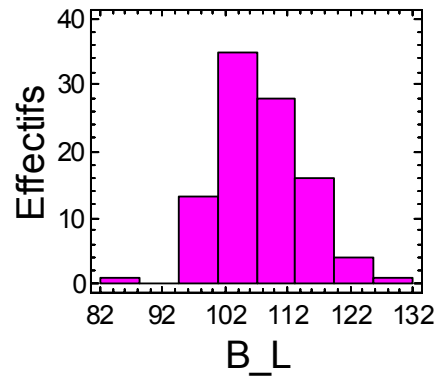
Annexe 3 : Test de Normalité de la population historique

A.3.1 Mesure Bregma - Lambda

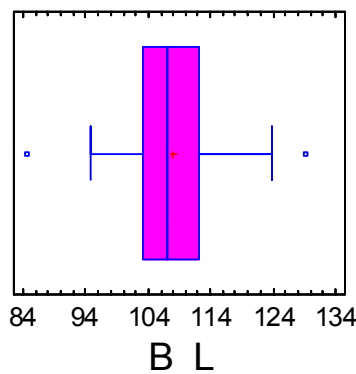
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: B_L
 Variable de sélection: B_L
 Effectif = 98
 Moyenne = 107,942
 Médiane = 107,05
 Ecart-type = 7,17302
 Minimum = 84,5
 Maximum = 129,3
 Asymétrie std. = 0,648094
 Aplatissement std. = 1,72112

Histogramme



Boîte à moustaches



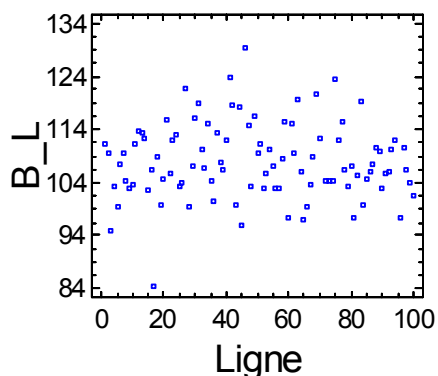
95%

Moyenne: 107,942 +/- 1,4381 [106,504; 109,38]
 Ecart-type: [6,29012; 8,34652]

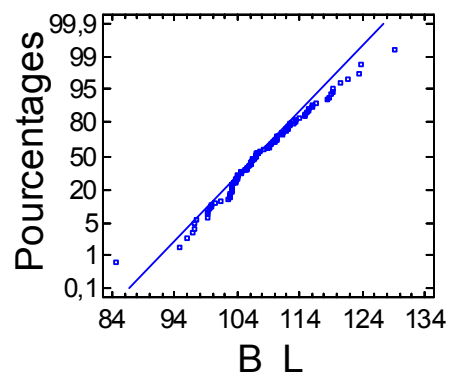
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,9369
 Autocorrélation d'ordre 1 = -0,0235365 +/- 0,197987

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

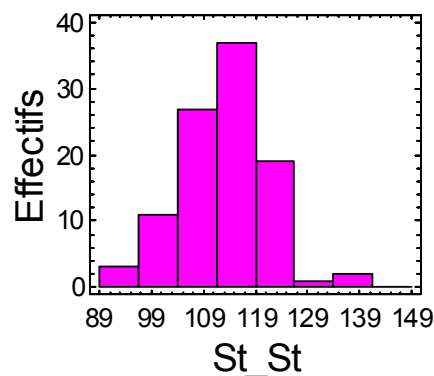
Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.2 Mesure Stéphanion – Stéphanion

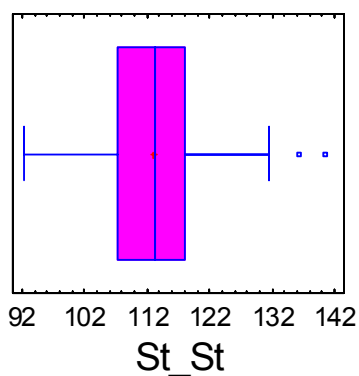
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: St_St
 Variable de sélection: St_St
 Effectif = 100
 Moyenne = 113,016
 Médiane = 113,2
 Ecart-type = 8,56887
 Minimum = 92,1
 Maximum = 140,6
 Asymétrie std. = 0,961433
 Aplatissement std. = 1,64575

Histogramme



Boîte à moustaches



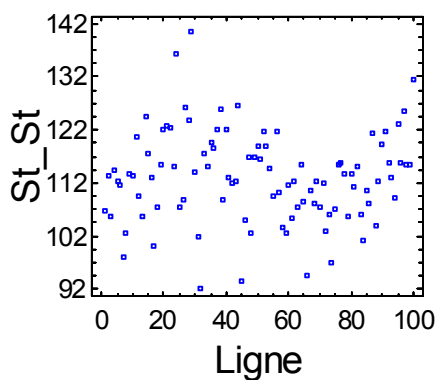
95%

Moyenne: 113,016 +/- 1,70025 [111,316;114,716]
 Ecart-type: [7,52353;9,95425]

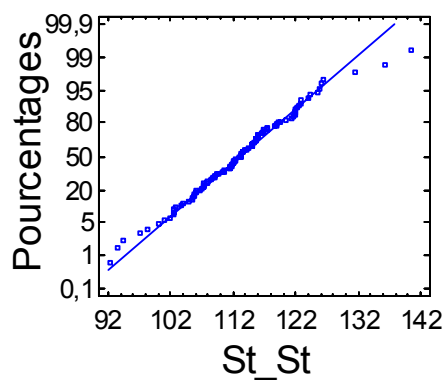
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,7789
 Autocorrélation d'ordre 1 = 0,224552 +/- 0,195997

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

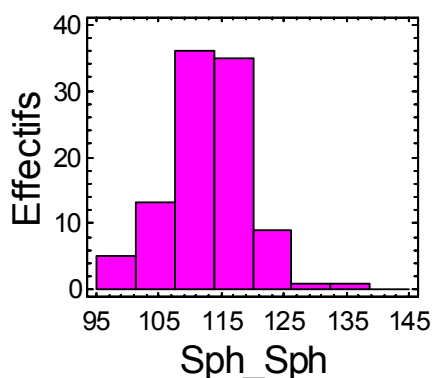
Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.3 Mesure Sphénion – Sphénion

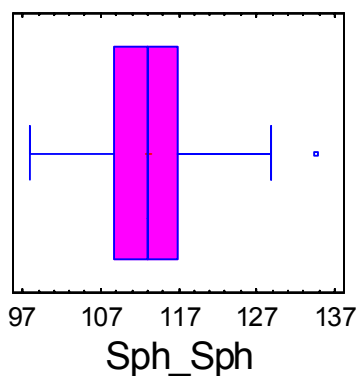
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: Sph_Sph
 Variable de sélection: Sph_Sph
 Effectif = 100
 Moyenne = 112,996
 Médiane = 113,15
 Écart-type = 6,5143
 Minimum = 97,8
 Maximum = 134,6
 Asymétrie std. = 0,645834
 Aplatissement std. = 1,30195

Histogramme



Boîte à moustaches



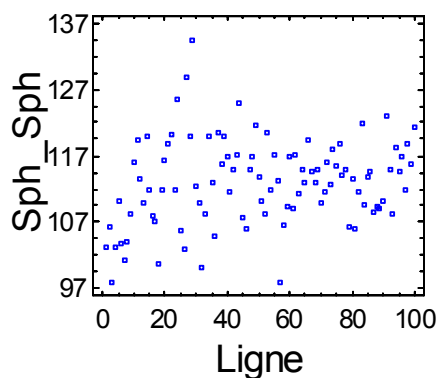
95%

Moyenne: 112,996 +/- 1,29258 [111,703;114,289]
 Écart-type: [5,7196;7,5675]

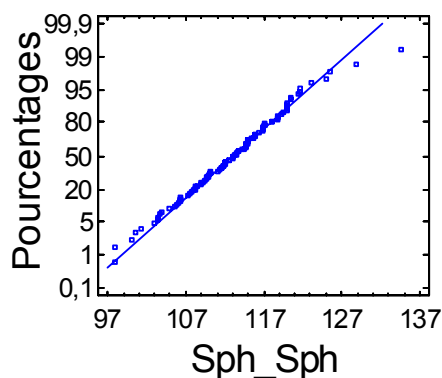
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,8850
 Autocorrélation d'ordre 1 = 0,242259 +/- 0,195997

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

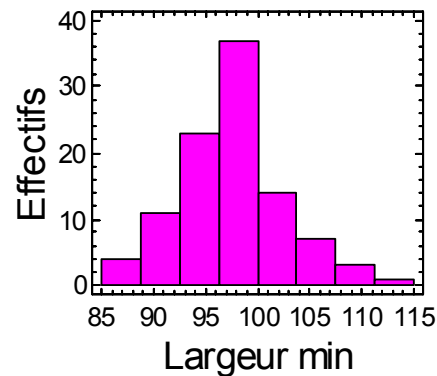
Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.4 Mesure Largeur frontale minimale

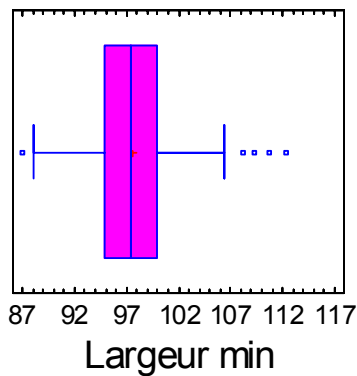
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: Largeur min
 Variable de sélection: Largeur min
 Effectif = 100
 Moyenne = 97,531
 Médiane = 97,45
 Ecart-type = 4,92745
 Minimum = 87
 Maximum = 112,3
 Asymétrie std. = 1,72307
 Aplatissement std. = 1,10733

Histogramme



Boîte à moustaches



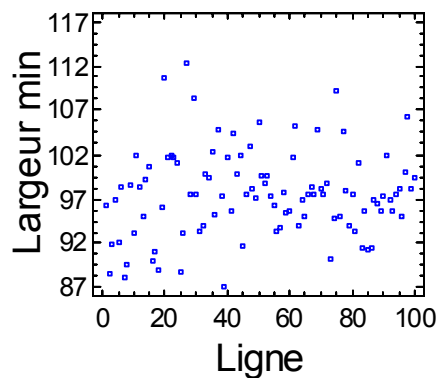
95%

Moyenne: 97,531 +/- 0,977714 [96,5533;98,5087]
 Ecart-type: [4,32633;5,72409]

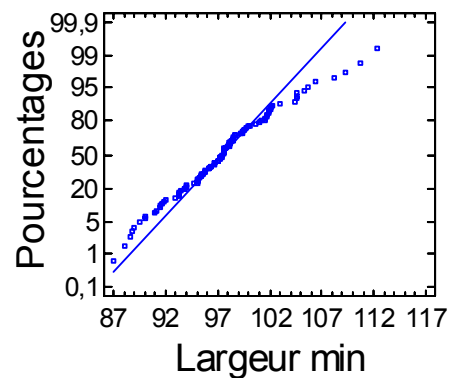
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,2192
 Autocorrélation d'ordre 1 = 0,0788876 +/- 0,195997

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

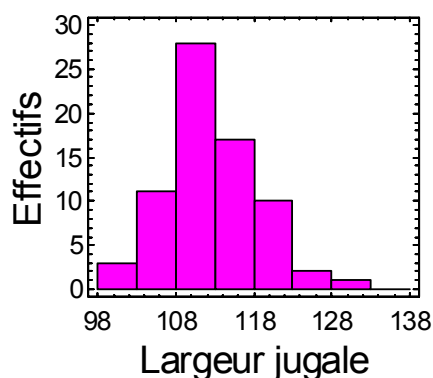
Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.5 Mesure Largeur bijugale

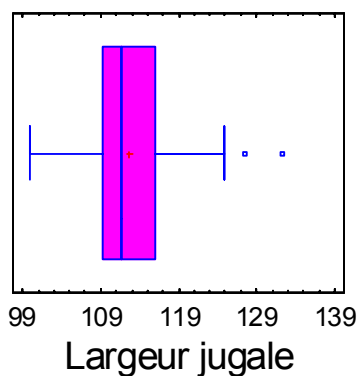
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: Largeur jugale
 Variable de sélection: Largeur jugale
 Effectif = 72
 Moyenne = 112,597
 Médiane = 111,8
 Ecart-type = 6,21112
 Minimum = 99,8
 Maximum = 132,2
 Asymétrie std. = 1,93976
 Aplatissement std. = 1,08685

Histogramme



Boîte à moustaches



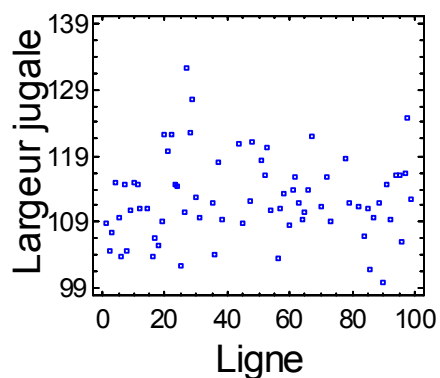
95%

Moyenne: 112,597 +/- 1,45954 [111,138;114,057]
 Ecart-type: [5,33626;7,43178]

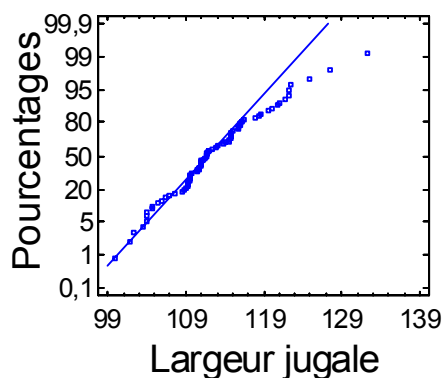
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,3463
 Autocorrélation d'ordre 1 = 0,227058 +/- 0,230984

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.6 Mesure Largeur biastérique

SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: Ast_Ast

Variable de sélection: Ast_Ast

Effectif = 99

Moyenne = 109,783

Médiane = 109,8

Ecart-type = 5,82121

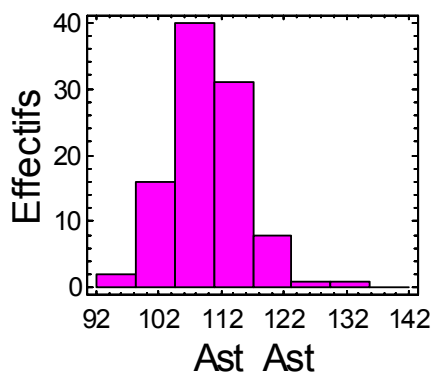
Minimum = 94,2

Maximum = 130,5

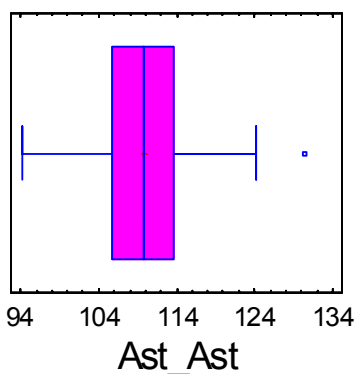
Asymétrie std. = 1,45968

Aplatissement std. = 2,2073

Histogramme



Boîte à moustaches



95%

Moyenne: 109,783 +/- 1,16102 [108,622;110,944]

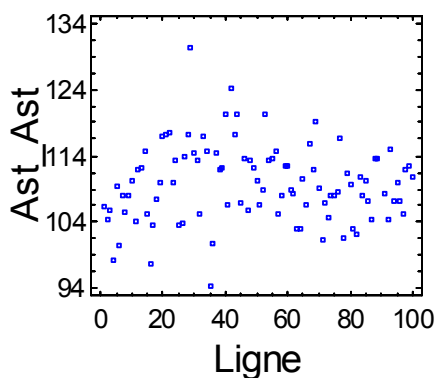
Ecart-type: [5,10791;6,76791]

Diagnostics

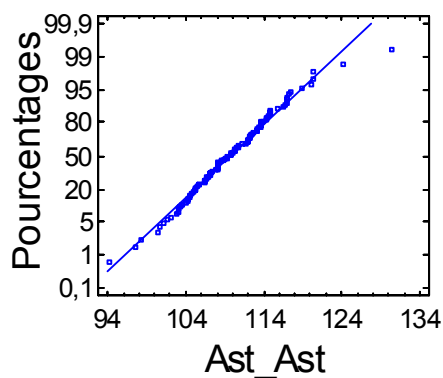
Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,9659

Autocorrélation d'ordre 1 = 0,256135 +/- 0,196984

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé n'est pas dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

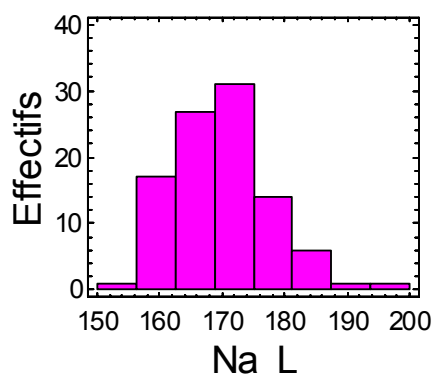
Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.7 Mesure Corde Nasion – Lambda

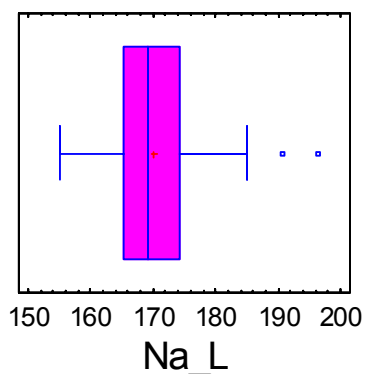
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: Na_L
 Variable de sélection: Na_L
 Effectif = 98
 Moyenne = 169,997
 Médiane = 169
 Ecart-type = 7,56877
 Minimum = 155,2
 Maximum = 196,3
 Asymétrie std. = 2,77462
 Aplatissement std. = 1,51575

Histogramme



Boîte à moustaches



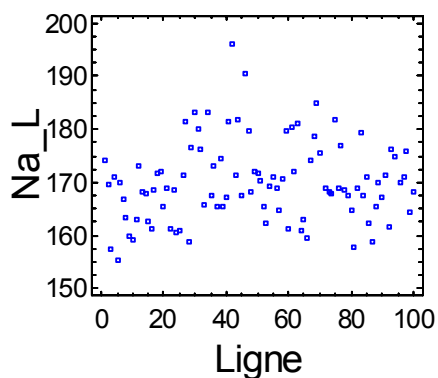
95%

Moyenne: 169,997 +/- 1,51745 [168,479;171,514]
 Ecart-type: [6,63716;8,80702]

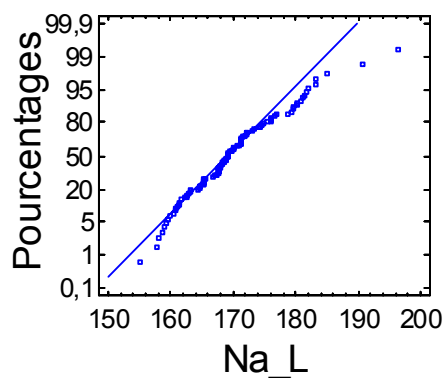
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,0556
 Autocorrélation d'ordre 1 = 0,183096 +/- 0,197987

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée n'est pas dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

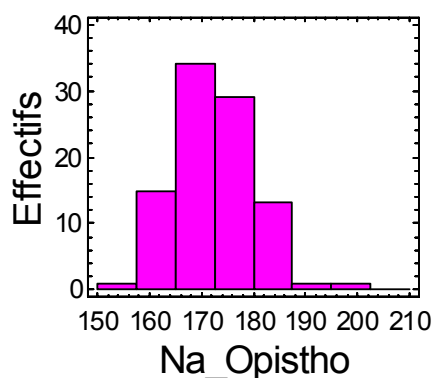
Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

A.3.8 Mesure Corde Nasion – Opisthocranion

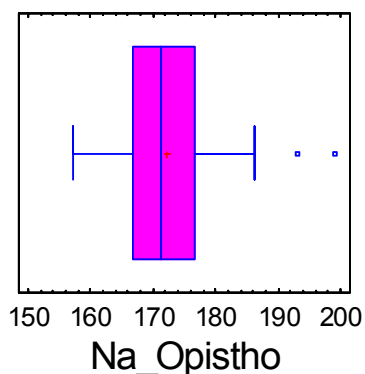
SnapStat: Analyse d'un échantillon

Variable des données: Na_Opistho
 Variable de sélection: Na_Opistho
 Effectif = 94
 Moyenne = 172,163
 Médiane = 171,25
 Ecart-type = 7,74326
 Minimum = 157,2
 Maximum = 199,3
 Asymétrie std. = 3,00049
 Aplatissement std. = 1,59004

Histogramme



Boîte à moustaches



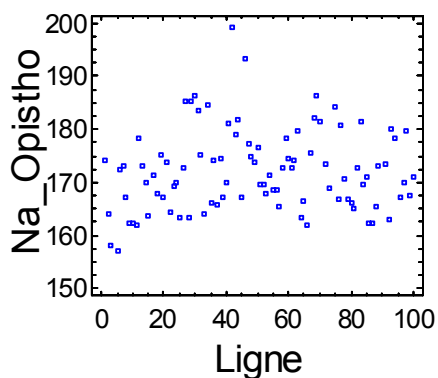
95%

Moyenne: 172,163 +/- 1,58598 [170,577;173,749]
 Ecart-type: [6,77251;9,04143]

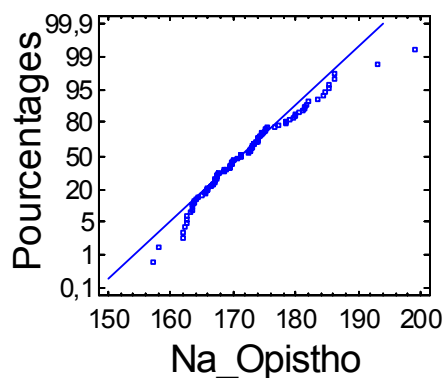
Diagnostics

Probabilité de Shapiro-Wilks = 0,0264
 Autocorrélation d'ordre 1 = 0,22312 +/- 0,202155

Graphique temporel



Graphique de normalité



Seuil de 0,05 ; Nombre de classes établi suivant les règles de Sturges.

La valeur de l'asymétrie standardisée n'est pas dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale. La valeur de l'aplatissement standardisé est dans la plage attendue pour des données suivant une loi normale.

Analyse réalisée sous Statgraphics Plus 5.0.

Annexe 4 : Mesures réalisées sur différents Hominidés

Tableau A6: Mesures relevées sur différents spécimens fossiles ; Abréviations définies en Chapitre 2 ; En gras : mesures relevées sur des modélisations tridimensionnelles de spécimens originaux ; Les autres spécimens sont des moulages ; Les mesures sont en millimètres.

Référence	Fmt-Fmt	Na-B	Na-L	Na-Op	B-L	Ast-Ast	St-St	Sp-Sp	Bosse	Ft-Ft	Ju-Ju	B-Prost
ARAGO 2005	125,3	105,2	176,1	196	97,9	134,6	114,7	109,9	139,1	112	126,9	185,9
ARAGO 1981	122,1	103,3	179	193,1	101,9	116,1	104,6	102,8	131,3	105	123,7	181,1
Biache-Saint-Vaast 2	124	116,8	190,9	202,3	115,7	131,2	100,3	112,7	124,7	101,6	121	184,7
La-Chapelle-aux-Saints	117,8	106,1	181,2	204,2	98,3	114,3	114	120,6	135,5	109,3	124,9	174,5
Neandertal	113,6	118,1	183,5	195,2	103,5	121,2	112,1	118,2	114,3	108	-	-
Teshik Tash	104,4	92,2	168,2	182	107,2	126,3	112,7	114,7	126,1	101	104,8	149,2
Amud 1	120,2	119,4	195	206,4	111,1	135,1	117,5	109,3	132,9	113,1	130,9	191,9
La Ferrassie 1	117,5	117,4	186,5	201,4	100	124	105,2	116,9	125,1	108,1	121,9	182,5
La Quina H5	109	107,6	184,2	202,1	103,3	109,7	103	98,1	110,6	103,9	119,6	-
La Quina H18	88,3	92,8	160,3	170,8	95,9	101,1	105,9	102,3	114,8	88,6	82,2	142,7
Monte Circeo 1	122	111,3	179	194,5	95,1	121,9	115,5	116,4	116,4	115,4	134,2	178,7
Saccopastore 1	118,5	91,2	173,2	180,9	110,7	115,3	105,8	115,2	120,9	103,3	-	168,1
Pataud	104,2	108,8	169,4	175,5	105,8	103,2	107,6	100,6	116,9	97,4	110,7	164,8
Skhull5	119,3	104,2	183,4	188,8	118,4	112,6	102,3	103,6	126,4	107,8	129,1	181,2
Qafzeh9	114,9	114,7	188,2	189	129	115,2	115,3	113	115,2	107	130,9	179,3
Jebel Irhoud1	125	108,5	183,7	191,3	117,7	122,2	109,4	117,8	132,3	106,9	-	173,6
Cro-Magnon1	115,8	121,3	188,7	193,6	118,1	104,9	112,9	118,7	142,3	101,3	107,5	179,6
Cro-Magnon 2	111,1	116,8	185,7	188,3	121,3	117,3	114,0	114,8	130,0	100,5	110,5	-
Cro-Magnon 3	110,6	129,2	192,8	198,6	122,9	127,0	105,6	115,2	144,8	98,7	-	-
Obercassel	102,8	107,8	176,9	174,7	126,1	104,4	104,6	105,2	111,1	96,0	113,4	164,7
Chancelade	114,8	115,6	187,8	189,9	129,6	111,1	103,9	118,9	115,6	103,0	122,9	180,3
Markina Gora	112,9	99,0	164,4	172,0	111,4	98,5	100,1	101,2	113,0	91,8	113,8	153,9
Predmost 3	119,2	119,8	187,1	195,4	114,8	111,8	117,8	121,9	128,9	104,0	125,9	189,5
Hotu Cave 2	104,0	111,3	180,4	180,1	122,5	101,4	105,8	106,4	126,7	95,5	112,9	168,9
Mldec 5	119,8	117,4	186,4	190,2	118,6	116,3	111,7	121,8	144,7	105,8	-	-
Ceprano 1	129,5	104,2	174,0	191,1	101,3	129,6	117,6	117,6	142,7	107,4	-	-
Sima de los Huesos 5	124,5	102,7	168,8	176,4	98,1	112,6	100,5	108,2	124,2	103,8	127,5	175,4
Petalona	129,0	108,9	179,6	198,0	103,1	138,2	100,3	113,2	121,7	109,7	137,5	187,1
Broken Hill	128,0	119,8	188,4	197,2	110,8	123,2	100,1	113,3	103,2	99,5	134,4	193,1
KNM-WT 15000	105,5	87,1	150,9	159,9	93,5	106,2	86,1	96,2	97,5	85,8	110,7	157,6
KNM-ER 3733	117,5	98,9	157,0	172,4	91,9	117,7	80,6	110,1	114,2	85,7	119,5	167,8
KNM-ER 3883	115,5	94,1	157,7	169,8	92,4	113,6	84,7	95,8	108,2	87,7	126,7	-
OH9	129,9	110,4	184,3	196,9	107,9	124,6	80,5	104,2	104,7	98,6	-	-
Sambungmacan 1	121,2	-	-	-	98,7	120,1	101,2	113,9	96,7	100,9	-	-
Sambungmacan 3	105,3	104,2	166,4	174,6	96,2	116,6	105,6	112,1	105,0	100,2	-	-
Ngawi1	107,0	107,3	169,9	182,4	92,1	127,8	99,4	114,5	83,8	98,2	-	-
Sangiran2	80,9	-	-	-	90,3	124,7	69,3	101,1	104,7	72,5	-	-
Sangiran17	108,6	113,8	173,8	198,6	86,2	116,7	88,2	112,9	99,6	98,2	142,0	178,0
Solo6	119,0	121,5	195,0	213,6	110,7	129,5	109,1	123,3	106,5	106,1	-	-
Solo7	115,0	118,8	178,5	191,1	96,4	130,9	109,7	113,5	100,6	106,4	-	-
Zhoukoudian XII	112,7	112,1	172,0	190,0	91,8	117,1	88,5	108,0	102,9	91,7	-	-

Zhoukoudian XI	109,6	109,8	168,6	187,7	85,3	110,4	84,7	107,4	108,3	94,1	-	-
Zhoukoudian III	102,4	101,8	173,3	190,1	95,9	114,5	90,8	97,7	103,2	89,4	-	-
Hexian	114,2	97,7	174,7	185,1	110,1	139,6	96,5	115,2	119,0	102,0	-	-
Sin niu shan	129,5	110,4	186,9	198,1	116,2	119,3	-	-	110,0	115,8	128,9	169,2
Dali	120,9	113,5	184,3	192,4	102,1	114,6	96,1	112,0	114,1	106,2	126,9	-
D2280	113	101	168,4	177,4	96,7	112,3	74,1	108,5	101,5	86,3	-	-
D2282	108,2	97,2	155,3	164,0	82,6	113,9	67,3	94,0	81,5	80,5	115,3	160,5
D2282 (proposition)	108,2	97,2	155,3	164,0	82,6	113,9	68	95	81,5	80,5	121,6	163
KNM-ER 1813	95,9	78,2	137,2	146,2	85,9	98,2	59,9	76,2	66,6	70,6	95,5	135,9
KNM-ER 1470	107,7	91,5	151,9	158,2	91,4	94,1	74,3	84,9	102,0	73,0	126,0	164,4
Sts 5	87,4	86,1	132,1	138,4	76,1	76,8	40,7	82,2	76,9	60,6	110,5	155,6
Sts 71	89,4	63,6	122,5	126,8	83,0	86,7	56,6	68,8	78,6	56,8	107,6	129,9
OH5	117,9	93,2	153,9	166,9	91,0	96,6	6,4	88,6	71,5	62,7	149,1	188,1
KNM-ER 406	110,2	91,0	145,9	155,1	79,5	83,7	5,8	77,8	57,3	59,8	133,1	164,2
KNM-ER 23000	100,9	95,9	151,0	154,6	87,4	95,2	6,2	87,7	79,9	63,7	-	-
KNM-ER 13750	106,8	93,2	147,9	155,3	82,2	93,0	6,3	82,6	65,5	68,8	137,8	-
KNM-WT 17000	-	86,8	148,9	150,3	99,4	97,7	-	77,3	54,5	60,6	130,5	163,3

PUBLICATIONS

GUIPERT, G., LUMLEY, M.-A. de, LUMLEY, H. de, MAFART, B. (2004) : Three-Dimensional Imagery: a New Look at the Tautavel Man. *In* SW (Eds) (ed.): [Enter the Past] The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage | CAA 2003 | Computer Applications and Quantitative Methods | Proceedings of the 31st Conference, Vienna, Austria, April 2003. Wien: BAR International Series, pp. 100-102.

GUIPERT, G., SUBSOL, G., JESSEL, J.-P., DELINGETTE, H., MAFART, B. (2003): The Fovea Project: A New Look at Human Past. *In* VSMM (ed.): Proceedings of the VSMM 2003, pp. 43-47.

MAFART, B., GUIPERT, G., LUMLEY, M.-A. de, SUBSOL, G. (2004) : Three-dimensional computer imaging of hominid fossils: a new step in human evolution studies. *Canadian Association of Radiologist Journal*, **55** : 264-270.

GUIPERT, G., MAFART, B.: Evolution de l'os frontal d'*Homo heidelbergensis* et *Homo neanderthalensis* et comparaison avec l'homme moderne. *Anthropologie* (Brno). Sous presse.

The FOVEA Project: A New Look at Human Past

Gaspard GUIPERT¹, Gérard SUBSOL², Jean-Pierre JESSEL³, Hervé DELINGETTE², Bertrand MAFART¹

1 Laboratoire d'Anthropologie, Faculté de Médecine, Secteur Nord, Bvd Pierre Dramard,
13916 Marseille, France 2 INRIA, Sophia Antipolis, Projet EPIDAURE, 06902 Nice, France
3 IRIT, Faculté des Sciences, Rangueil, Toulouse, France
foveaproject@free.fr

Abstract. Use of virtual imagery is getting more and more predominant in the study of fossil remains. The FOVEA project (Virtual Excavation of Paleo-Anthropological Environment) proposes to build a 3D virtual model of a prehistoric site that is exhaustive (i.e. including the geology, the artefacts and the fossils), interactive and that will be made available to the scientific community via Internet. We describe a preliminary part of this project, which consists in the reconstitution of the oldest Frenchman, Tautavel Man, by assembling and deforming the 3D virtual models of the fossil skull fragments.

Keywords: Palaeontology; Virtual fossil reconstruction; Virtual reality; Tautavel Man; Homo erectus

1. Introduction

Each day, digital images and three-dimensional representations are getting more and more predominant in our representation of the future, in the present life, but also in the study of the past. In particular, archaeology as well as palaeontology [1], and through them, the study of the fauna [2], of typology [3], sedimentology [4] and paleoanthropology [5] are from now on fields of application of digital imagery... but so far, mostly in a dissociated way. There are very few links between as well as within these fields. Moreover, very often the collected data are not exploitable, or with difficulty, by others than those who obtained them [6]. Hence the understanding of the past as well as the preservation of its traces is limited.

The two-years FOVEA project (Virtual Excavations of Paleo-Anthropological Environment), established within the framework of the CNRS (French Center of Scientific Research), was set up so as to gather and then coordinate these disciplines in order to better collect, exploit, archive and share data resulting from an excavation.

After having introduced the general research orientations of this project, we will present a concrete example of using virtual reality technologies to safeguard the past: the reconstitution of the skull of the Tautavel Man, the "Oldest Frenchman" (-450,000 years old).

2. Overall presentation of the FOVEA project

FOVEA aims to model in 3 dimensions a prehistoric excavation site (Caune of Arago, Tautavel, France) through all its components.

The first axis will refer to the reconstitution of the subsoil and its various geological layers. The user must be able not only to visualize the layers but also to manipulate interactively them, for example to pile up or to deform layers in order to compensate for the geological deformations that have taken place after the deposition. Such a modelling must also take into account the different physical behaviour of the layers (sand, rocks...).

The second axis will consist in a virtual study of these layers, which must give access to the found artefacts (bones, tools, installations, traces of fire). First, it will be necessary to enter all the remains (tools, bones...) into a database, from which the choice of a reference will give us access to the object type, to the 3D co-ordinates of the object (x, y, z), but also to its dimensions (length, width, thickness), as well as to its orientation (geographical and vertical). This database, connected to a 3D dynamic representation of the soil, will thus make it possible to interactively highlight grounds of habitats, specific workshops (butchery, tool cutting, camp sites...) or specifically locate the artefacts by category, size or orientation. Another point will consist in acquiring a 3D representation of these objects, with the aim of indexing or refitting them automatically, after having carried out an automatic extraction of shape or texture attributes.

The last axis is the 3D modelling of the fossils. From digital slices (obtained for example by a CT-scanner), it is possible to reconstitute 3D virtual models and then to study human remains without fear of deterioration, to visualize easily the internal structures, to carry out morphometric analyses, or to test hypotheses for compensating post-mortem deformations. We show in the next section an example of using 3D models of fossil skull fragments to propose a new reconstitution of the complete skull.

3. A first application: using 3D models to suggest a new reconstruction of the Tautavel Man

3.1. The fossils and the manual reconstruction

In 1971, a human face was discovered in the Caune de l'Arago, a cave located at Tautavel, France, in the layer G dated to 450,000 years BP [7; 8]. It was the 21st human remains found in this place, therefore called Arago 21. In 1980 was discovered an incomplete right parietal bone, Arago 47, which could be adjusted with the face. Those two bones were called Tautavel Man, who was identified as a *Homo heidelbergensis*. The minute study of isolated small bone fragments in the palaeontology laboratory led to the discovery of two other parietal fragments, Arago 47A and Arago 3A corresponding to the right and left sides of the bregma area of the same individual.

Arago 21 is a complete face, including malar, maxillary, nose and frontal bones (see Figure 1, left). There are many deformations, structural and superficial, due to a lateral pressure after

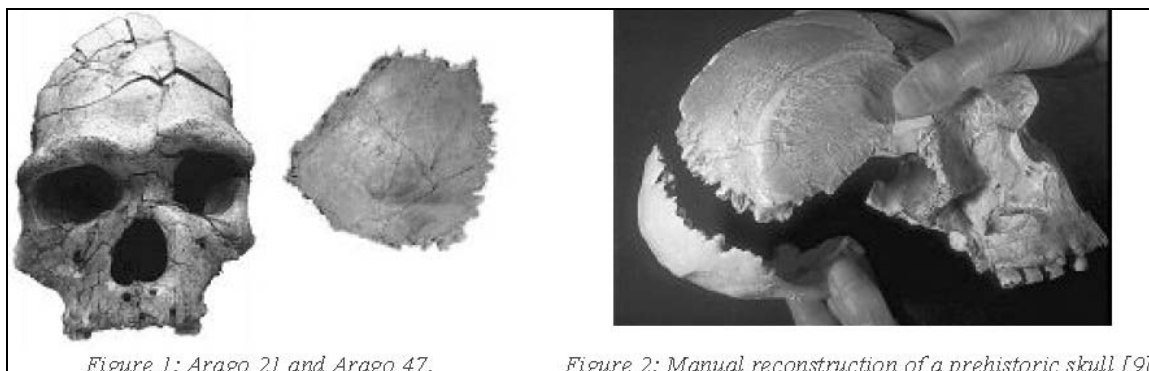


Figure 1: Arago 21 and Arago 47.

Figure 2: Manual reconstruction of a prehistoric skull [9].

depositing and the most distorted part is the left side of the face. The external surface of the right malar bone is deep, without internal deformations. The right parietal bone, Arago 47 is incomplete (see Figure 1, right). The posterior and temporal parts are totally preserved with a large angular torus and a portion of the sagittal suture. We can notice 2 mm of coronal suture and it is the principal clue that allows us to say that it is the same individual than Arago 21. Arago 47A and 3A are two parietal bregma fragments fitting together with the frontal, that allows us to reconstruct the anterior part of the sagittal suture.

A first reconstruction of the overall skull was performed in 1981 by M.-A., H. de Lumley and R. David. They manipulated manually the fragments (see Figure 2) and adjust them with parts of mouldings of other skulls (Swanscombe for the occipital part, Sangiran 17 for the temporal part). Nevertheless, this reconstruction have to be improved. The posterior curvature between the two parietals (original and reconstructed) does not correspond to an anatomical structure, creating an unusual protuberance. The reconstructed face is distorted, not balanced, still asymmetric (different orbital cavities, slantwise nose...). The sagittal suture is not in line with the lateral curvature and some anthropological landmarks are not aligned. Finally, the asterion-lambda-asterion angle is too short for a Middle Pleistocene Hominid. The reconstruction looks more like that of the present *Homo sapiens*, and some anatomical characteristics are incompatible with *Homo heidelbergensis* (i.e. torus angularis, parietal thickness, supra-orbital torus, prognathism).

3.2. A virtual reconstitution based on 3D models

The fossil skull is placed into the Computer Tomography device that gives, in a few minutes, a series of 180 digital images representing the successive slices of the anatomical structure (see Figure 3). These images are of a resolution of 512 by 512 pixels, which are coded in several thousands of gray levels. They are then stacked in order to build up a three-dimensional image. CT-Scan devices that are routinely used in medical radiology have a resolution of one or half millimeter whereas special industrial micro-scanners can reach up to a resolution of one hundred microns [10].

Some 3D image processing algorithms developed for medical imaging or Computer Assisted Design are then applied to extract the surface of the structure from the 3D image and to display it, from any point of view, on the screen of a computer. Such programs allow

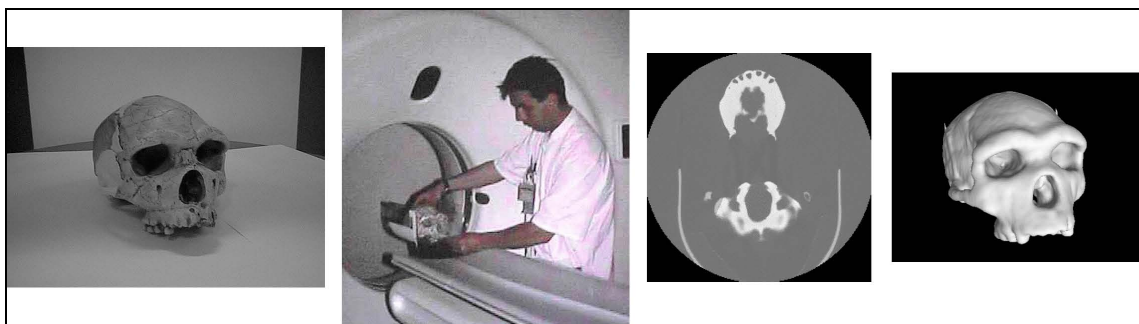


Figure 3: From the real skull of the Tautavel Man to a virtual 3D model [15; 16].

also one to manipulate the 3D models of the fragments in order to reconstruct a complete skull [10; 11; 12; 13]. Thus, for our virtual reconstruction, we have used Materialise software (Magics 7.5 and Mimics 7.1 [14]) in collaboration with Initial Society and P. Corbex.

We have taken into consideration the different points of view [17; 18; 19] about the reconstruction of the skull of the Tautavel Man and we have then used external anatomical features (parietal line, coronal suture) to position the bone fragments on the computer screen.

First, we were looking to obtain a more accurate version of face: we corrected the frontal bone (width, positioning of fragments, curvature). Thanks to the deformation tool that allows the user to deform locally the shape of the model mesh, we modified the nose in order to have a less distorted nasal cavity and a smaller rise of the right malar bone. Then, we chose to keep only the right side of the face, which is the less deformed and we mirror it in order to obtain a symmetric face. These manipulations corrected the inferred effects of general deformation due to the compression of the face that occurred during fossilization.

In the second place, we had to position the parietal bone (Arago 47): we used the portion of the coronal suture to connect the parietal and the frontal bones, like in the former reconstruction. Nevertheless, we rose the parietal right posterior part, using measurements obtained by preliminary work on a moulding. It allowed us to test different arrangements. After that, we did a reconstruction of the midvault by mirroring the right parietal bone. Only for comparison (see Figure 4), we adjusted on our rebuilding the occipital of Swanscombe, but not the two-bregma fragments, which were not scanned at that time.

We can see the new reconstruction in Figure 4. We observe a growth of the missing pterion part and a reduction of the missing sagittal suture. In the lateral and the sagittal view, we can see the connection of parietal and the frontal bone, with a continuity of the parietal line. There is no more break anymore between the face and the parietal in superior view (Figure 4, on the left). The sagittal suture is now straight, without curvature. The midvault is more rounded in frontal view. The asterion-lambda-asterion angle is growing too. The former reconstruction gave a value of 73° for asterion-lambda-asterion. The new value is $90,7^\circ$. For comparison, the average of *Homo sapiens* is 85° and, for *Homo neanderthalensis*, it varies between 70 and 99° and between 87 and 108° for *Homo erectus* [20]. This new measurement corresponds more to an old hominid.

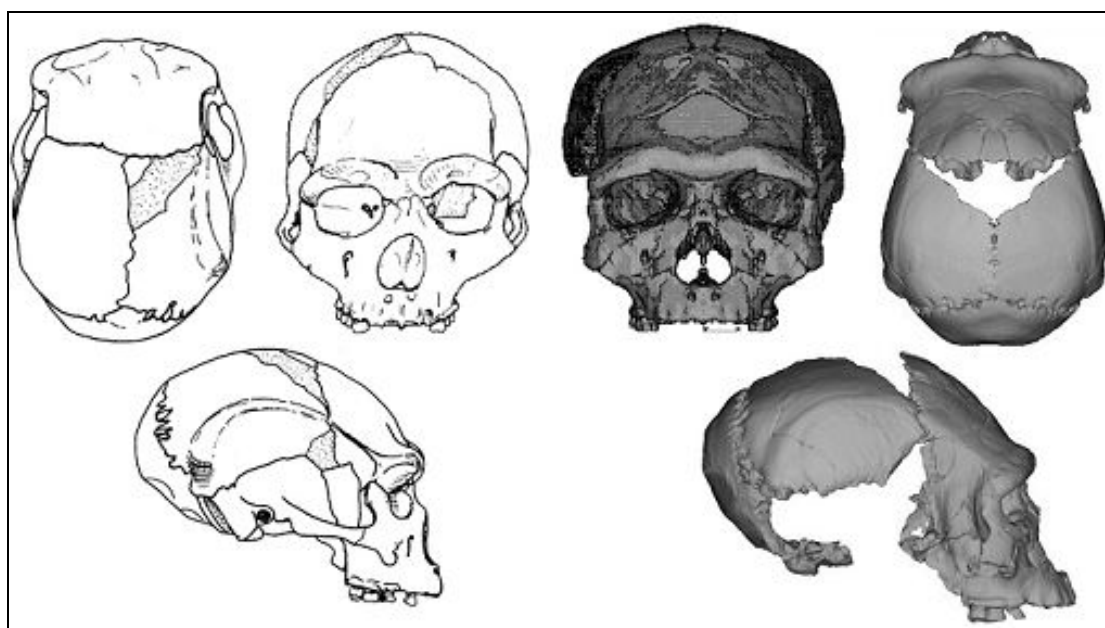


Figure 4: Different views of former (left) and newer reconstitutions (right) of the Tautavel Man. We can see in the newer reconstitution a better continuity between the facial and the parietal fragments.

This work on the Tautavel remains will be finished with the addition of the two-bregma fragments. With 3D image processing software, we will be able to correct definitively and precisely the curvature of the superior part of the frontal bone and the coronal suture. Our work will consist in levelling out the small excrescences created by frontal deformation. After that, we will have a consistent sagittal outline from the rhinion and the nasion to the bregma, beginning of sagittal suture, a small gap (2 cm) and the rest of the sagittal suture to the lambda (Figure 4, right).

This new reconstruction leads to a new paleo-anthropological interpretation. Now, the anatomical characters look more archaic than later Middle Pleistocene *Homo erectus* and *Homo heidelbergensis*. Comparison with the skulls of other fossil men allows us to place this reconstitution closer to an older skull, the one from Ceprano, *Homo cepranensis* [21]. Our new reconstruction shows anatomically many similarities: a broad nasal bone, a torsion of the supraorbital torus, a bilateral discontinuity of the supratrochlear sulcus, a pronounced postorbital constriction, a frontal keel, a flattened parietal, a maximum breadth across a prominent angular torus, and a low cranial vault. The dimensions of temporal bone of the Ceprano Man correspond to the gap in the Tautavel Man. A comparison with this man, who died 900,000 or 800,000 years B.P. [21], points out the archaic characteristics of Arago 21-47 [22].

4. Discussion and conclusion

This example shows how it is possible to go from a deformed, fragile, difficult to handle fossil to a virtual reconstruction easy to manipulate and study. The power of 3D image processing and modelling tools allow to perform manipulations that are very difficult (mirroring) or even impossible (local deformation) to do on the mouldings which are used in

manual reconstruction.

Moreover, such tools open new fields of research, in particular to compute and process 3D morphometric measurements [15; 23]. Another technology that can also enable us to manipulate these reconstructions concretely is stereolithography [24], that synthesize a model in resin based on the virtual model.

The presented work is the first result obtained within the FOVEA Project. We hope to be able to present in two years some Virtual Reality tools that give an interactive and global 3D view of an excavation in real time. Until now, the excavation of a site was equivalent to its destruction, to a representation of the environment in texts, and to the storage of the artefacts in drawers, accessible only to a minority. From now on, these fossils records will also be represented in their contexts, preserved on hard disks and Web servers and accessible to all. Such a site, although disappeared in real life, will constitute a virtual heritage to new generations of diggers who will be able to study it from any location in the world.

Acknowledgement

The work described in this paper is currently part of research carried out in the FOVEA Project funded by the Program —Société de l'Information— of the French Center of Scientific Research, CNRS.

References

- [1] B. Mafart, H. Delingette, dir —Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology—. Archeopress. British Archaeological Reports International Series 1049 (2002) 108p.
- [2] S. Figgins, Graphics in Computational Paleontology. IEEE Computer Graphics and Applications, 6-13, Nov./Dec. 2001.
- [3] J. Riel-Salvatore et al. —The Past Meets the Future: 3D Visualization Technology and Lithic Analysis at Wadi al-Hasa Locality 623X, Jordan— Journal of Human Evolution, 42:3 (2002) A1-A39.
- [4] <http://www.ensg.inpl-nancy.fr/GOCAD/>
- [5] C. Zollikofer et al. Computer-assisted paleoanthropology. Evolutionary Anthropology, 6 (1998) 41-54.
- [6] G. Weber. —Virtual Anthropology (VA) : A Call for Glasnost in Paleoanthropology—. The Anatomical Record (The New Anatomist), 265 (2001) 193-201.
- [7] H. & M.-A. de Lumley. Pre-Neanderthal Human Remains from Arago Cave in South-eastern France. In: Yearbook of Physical Anthropology, ed. J. Buettner-Janush. Washington, 1973, 162-168.
- [8] Y. Yokoyama et al. Datation directe par la spectrométrie gamma non destructive des restes humains: comparaison avec d'autres méthodes. In Datation et caractérisation des milieux Pléistocènes, ed. CNRS. Bordeaux: Raynal, J.-P., Miallier, D., 1991, pp. 11-17.
- [9] <http://www.tautavel.culture.gouv.fr/>
- [10] J. Thompson and B. Illerhaus. A new reconstruction of the Le Moustier 1 skull and investigation of internal structures using 3-D- μ CT data, Journal of Human Evolution, 35 (1998) 647-665.
- [11] A.D. Kalvin et al., Reconstruction of Human Fossils. IEEE Computer Graphics and Applications, 15:1 (1995) 12-15.
- [12] M.S. Ponce de León, and C.P.E. Zollikofer. New Evidence from Le Moustier 1: Computer Assisted Reconstruction and Morphometry of the Skull. The Anatomical Record, 254 (1999) 474-489.
- [13] M. Braun et al., Les reconstitutions virtuelles des hommes préhistoriques. Dossier Pour la Science : Les origines de l'humanité, 1999, pp. 78-81.
- [14] <http://www.materialise.com/>
- [15] G. Subsol et al. 3D Image Processing for the Study of the Evolution of the Shape of the Human Skull : Presentation of the Tools and Preliminary Results. In XIV International Congress of Prehistoric and Protohistoric Science, Liège (Belgium), September 2001. Abstract page 22 in preprints, full text in: B. Mafart and H. Delingette with the collaboration of G. Subsol (eds.), Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology. British Archaeological Reports International Series 1049

- (2002) 37-45.
- [16] B. Mafart et al., Imagery and Paleontology: Shape differences between the skull of Modern Man and that of Tautavel Man". B. Hidoine, A. Paouri (designers and directors). Video 451-452. INRIA Multimedia Scientific Communication Department, 1999. This movie was showed at the exhibition Homo Erectus à la conquête du monde, Musée de l'Homme, Paris (France) during several months in 2000. Video available at: <http://www.inria.fr/multimedia/Videotheque/0-Fiches-Videos/451-fra.html>
 - [17] D. Grimaud, Evolution du pariétal de l'Homme fossile. Position de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés.
 Doctorat de 3^{ème} cycle: "Géologie des formations sédimentaires", option: Géologie du Quaternaire et Préhistoire, 1982.
 - [18] E. Spitory, L'occipital de l'Homme de Tautavel. Essai de reconstitution. In 1er Congrès international de Paléontologie Humaine. L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles, ed. CNRS. Nice, 1982, pp. 89-109.
 - [19] E. Vlcek, Les Anténéandertaliens en Europe Centrale et leur comparaison avec l'Homme de Tautavel. L'Anthropologie (Paris), 90 (1986) 503-513.
 - [20] E. Spitory, Evolution de l'os occipital chez les Hominidés. Doctorat de 3^{ème} cyle: "Géologie des formations sédimentaires", option Géologie du Quaternaire et Préhistoire, Université de Provence. Unpublished, 1984.
 - [21] F. Mallegni et al. Homo cepranensis sp. nov. and the evolution of African-European Middle Pleistocene hominids. Comptes Rendus Palevol, 2 (2003) 153-159.
 - [22] G. Guipert. Three-dimensional imagery, a new look at the Man of Tautavel, In Enter the Past, CAA 2003, Vienna. Oral communication.
 - [23] G. Guipert, La variabilité de l'os frontal chez les Anténéandertaliens et Néandertaliens en Europe. Diplôme d'Etudes Approfondies, Université de la Méditerranée. Unpublished, 2001.
 - [24] Seidler et al. A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill : implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution. Journal of Human Evolution, 33 (1997) 691-703.

[Enter the Past] - Computer Applications in Osteology

THREE-DIMENSIONAL IMAGERY : A NEW LOOK AT THE TAUTAVEL MAN

GASPARD GUIPERT
MARIE-ANTOINETTE DE LUMLEY
HENRY DE LUMLEY
BERTRAND MAFART

LABORATOIRE D'ANTHROPOLOGIE, FACULTÉ DE MÉDECINE, SECTEUR NORD, MARSEILLE, FRANCE GASPARD.GUIPERT@TIMONE.UNIV-MRS.FR
ABSTRACT

In 1981 was shown an empirical reconstitution of the incomplete skull of a fossil man called the Tautavel Man. The recent advent of digital picture gave us a second opportunity to study the fragmentary remains (Arago 21 & 47) of the 'Oldest Frenchman' (450,000 years old). After researches on the original fossil records as well as on X-ray digital acquisitions, we made a 3D model by virtually replacing the fossils. A preliminary work was realized on solid cast then, in a second step, the considered placements were analyzed virtually. The correct middle face was mirrored, different deformations were balanced, the right parietal was placed differently. The lack of some bones was counterbalanced by a substitution with others more or less contemporary European skulls (Sima de los Huesos,...) digitalized as well. The different hypotheses can be tested directly, preventing a long and expensive work by means of cast reconstitution, which often proves difficult to handle. This work will allow us to better know the hominids of the Middle Pleistocene by resituating the Tautavel Man more accurately, while waiting for the discovery of the missing fragments during future excavations.

INTRODUCTION

In 1971, a human face was discovered in the "Caune de l'Arago", a cave in Tautavel, France, in layer "G" dated to 450,000 years BP (Lumley 1973, Yokoyama 1991). It was the 21st human remains found in this place, therefore called "Arago 21" (Fig.1). In 1980 was discovered an incomplete right parietal bone, "Arago 47", which could be joined with the face. Those two bones were baptized "Tautavel Man", a *Homo heidelbergensis*. Other discoveries were realized in the laboratory after studying isolated small bone fragments. We have two other parietal fragments corresponding to the right and left sides of the bregma area. They concern the same individual. At the moment other fragments are under consideration : one left parietal bone and two foramen magnum parts. A first reconstruction was realized in 1981; nowadays, with new technologies, we can improve this modelling.



Figure 1 (left) Frontal view of Arago 21

MATERIALS AND METHODS

[1] Specimens

We used 4 human remains : Arago 21, Arago 47 & 47A, Arago 3A. Arago 21 is a deformed face, due to a lateral pressure after depositing. This face is complete, including malar, maxillary, nose and frontal bones. There are many deformations, structural and superficial. The most distorted part is the left side of the face. The external surface of the right malar bone is deep, without internal deformations. The right parietal bone (Arago 47) is incomplete. The posterior and temporal parts are totally preserved with a large angular torus and a portion of the sagittal suture. We have 2 mm of coronal suture. It is the principal clue that allows us to say that it is the same individual. Arago 47A and 3A are two parietal bregma fragments fitting together with the frontal and permitting us to reconstruct the anterior part of the sagittal suture.

The first reconstruction, quite acceptable in those days, was achieved by M.-A. & H. de Lumley and R. David with an empirical method using those fragments and parts of mouldings of other skulls (Swanscombe for occipital, Sangiran 17 for temporal). Improving of this reconstruction was however necessary. Indeed, the posterior curvature between the two parietals (original and reconstructed) did not correspond to an anatomical structure, creating an unusual protuberance. The face was distorted, not balanced, always asymmetric (different orbital cavities, slantwise nose,...). The sagittal suture was not in line with the lateral curvature. Also, the landmarks were not aligned. Finally, the asterion-lambda-asterion angle was too short for a Middle Pleistocene Hominid. It was more like that of the present *Homo sapiens*, with anatomical characteristics incompatible with *Homo heidelbergensis* (i.e: torus angularis, parietal thickness, supra-orbital torus, prognathism).

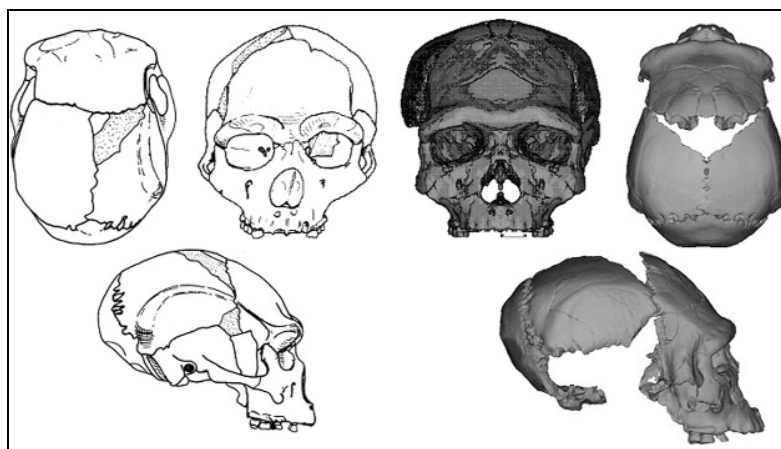


Figure 2 (right) Different views of former (left) and newer reconstitutions (right) of the Tautavel Man.
We can see the junction point between the face and the parietal

[2] Computer analysis

In collaboration with Initial Society and P. Corbex, we worked on computers with different software's (Mimics 2001, Magics 2001) and 0.5 mm thick CT scans of the original bones. We wanted to use virtual reconstruction because of the brittleness of the original fossil material and to prevent physical disassembly.

[3] Methodology

After researches on the original fossil records as well as on X-ray digital acquisitions and by taking into consideration the different points of view (Grimaud 1982, Spitery 1982, Vlcek 1986), we performed a computerized reconstruction of the skull. We used external anatomical features (parietal line, coronal suture) to position the bone

fragments on the computer screen. The inferred effects of general deformation due to the compression of the face that occurred during fossilization were corrected by mirroring.

RESULTS

The consequences of the new bone arrangements are the following. We observe a growth of the missing pterion part and a reduction of the missing sagittal suture. The asterion-lambda-asterion angle is growing too. In the lateral and the sagittal view, we can see the connection of parietal and the frontal bone, with a continuity of the parietal line. There is no more break anymore between the face and the parietal in superior view (Fig.2, on the left). The sagittal suture is now straight, without curvature. The midvault is more rounded in frontal view.

The occipital bone and the midvault fit together without any modification. That was not the case with the former reconstruction which required an occipital adjustment by cutting off the occipital suture. It gave a value of 73° for asterion-lambda-asterion. The new value is 90,7°. For comparison, the average of Homo sapiens is 85° and, for Homo neanderthalensis, it varies between 70 and 99° and between 87 and 108° for Homo erectus (Spitery 1984). This new measurement corresponds more to an old hominid.

Table 1 indicates intermediate results, estimated and direct measurements taken from the newer and former reconstructions, 4 Homo neanderthalensis and 3 other European Hominids. These measurements were realized on mouldings.

	Max Midvault Width	As-As Width	La - G Line (M3)	La - Na Line	La - B line	B - G	B - Na	Min Frontal Width (M9)	Max Torus Width	Max Frontal Width (M10)
Ceprano	156	128	174	175	101	102	106	106	130	118
Arago 2003	159	122	183	181	98	105	110	114	132	124
Arago Swanscombe	142	112	181	175	100	103	105	103	125	107
Petralona	143	119	186	180	104	108	109	110	133	119
Sima de los Huesos 5	139	112	168	169	98	99	102	104	124	114
Neandertal	147	119	186	184	105	112	117	108	121	121
La Chapelle-aux-Saints	152	113	187	182	100	105	105	108	122	123
La Ferrassie	154	112	189	188	104	118	121	107	120	120
Monte Circeo	153	116	178	176	93	109	112	110	122	123

Table 1 Comparative table (Italicized numbers represent estimations. All the values are in mm.)

In the first place, we sought to obtain a more accurate version of face: we corrected the frontal bone (width, positioning of fragments, curvature), we modified the "nose" so as to have a less distorted nasal cavity and a smaller rise of the right malar bone (the external aspect of the left malar bone is correct, but not its location) and finally, we finished the face reconstruction by mirroring to preserve the right side, which is the less deformed. In the second place, we had to position the parietal bone (Arago 47): we used the portion of the coronal suture to connect the parietal and the frontal bones, like in the former reconstruction. Nevertheless we rose the parietal right posterior part, using measurements obtained by preliminary work on a moulding. It allowed us to test different arrangements. After that, we did a reconstruction of the midvault by mirroring the right parietal bone. Only for comparison (Fig.2), we adjusted on our rebuilding the occipital of Swanscombe, but not the two bregma fragments which were not scanned at that time.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The work on the Tautavel remains will be finished within a few months with the addition of the two bregma fragments. We will be able to correct definitively and precisely the curvature of the superior part of the frontal bone and the coronal suture. Our work will consist in levelling out the small excrescences created by frontal deformation.

After that, we will have the sagittal outline from the rhinion and the nasion to the bregma, 2 cm of sagittal suture, a small gap (2 cm) and the rest of the sagittal suture to the lambda.

Anatomical characters look more archaic than later Middle Pleistocene *Homo erectus* and *Homo heidelbergensis*. Comparison with the skulls of other fossil men allows us to place this reconstitution closer to an older skull, the one from Ceprano, *Homo cepranensis* (Mallegni et al. 2003). Our reconstruction shows many similarities with this skull: a broad nasal bone, a torsion of the supraorbital torus, a bilateral discontinuity of the supratatorial sulcus, a pronounced postorbital constriction, a frontal keel, a flattened parietal, a maximum breadth across a prominent angular torus, and a low cranial vault. Anatomically, the Ceprano Man shares many features with our reconstruction and the dimensions of his temporal bone correspond to the gap in the Tautavel Man. Figure 3 illustrates the closeness between them. A comparison with this man who died 900,000 or 800,000 years ago (Mallegni et al. 2003) points out the archaic characteristics of Arago 21-47. The dating back to 450,000 years BP is an estimation, but we could imagine that this man is even older. We will develop this question when this work is totally finished.

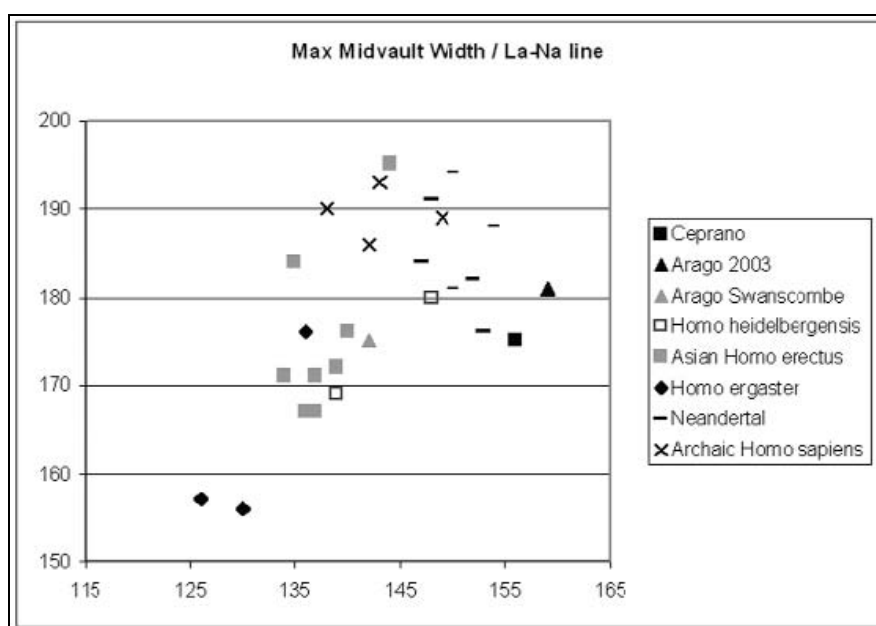


Figure 3 Comparison of different Hominid populations with the newer reconstruction of Arago

We will continue our reconstruction by assembling this one with the two bregma parietal fragments and by filling the missing parietal anterior parts. Another part of the work will consist in finding similar skulls in order to reconstruct the missing parts. After scanning those skulls, we will "carve" them to take the interesting fragments (temporal, sphenoid and occipital bones). Presently, the most interesting skull is Ceprano. Once this stage has been achieved, we will be able to make resin models by stereolithography (Zollikofer 1998, 2002).

With digital technology, we will suggest a new reconstitution after we have directly tested different hypotheses, preventing a long and expensive work, by means difficult to handle cast reconstitutions. This work will allow us to have a new vision on the Hominids of the Middle Pleistocene by better situating the Tautavel Man, pending further discoveries of the missing fragments during future excavations.

ACKNOWLEDGEMENT

Initial Society and Patrice Corbex for their help. We are deeply grateful to Francis for translation and to Valérie for

her assistance.

REFERENCES

GRIMAUD, D., 1982. Evolution du pariétal de l'Homme fossile - Position de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés. Doctorat de 3ème cycle: "Géologie des formations sédimentaires", option: Géologie du Quaternaire et Préhistoire.

LUMLEY, H. and LUMLEY, M.-A. de, 1973. Pre-Neanderthal Human Remains from Arago Cave in South-eastern France. In Buettner-Janusch, J. (ed.), Yearbook of Physical Anthropology, Washington.

MAGICS 7.5., 2001. Materialise. Leuven, Belgium.

MIMICS 7.1., 2001. Materialise. Leuven, Belgium.

MALLEGNI, F., CARNIERI, E., BISCONTI, M., TARTARELLI, G., RICCI, S., BIDDITTU, I. and SEGRE, A., 2003. Homo cepranensis sp. nov. and the evolution of African-European Middle Pleistocene hominids. Comptes Rendus Palevol 2:153-159.

SPITERY, E., 1982. L'occipital de l'Homme de Tautavel. Essai de reconstitution. In CNRS (ed.), 1er Congrès international de Paléontologie Humaine - L'Homo erectus et la place de l'Homme de Tautavel parmi les Hominidés Fossiles, Nice:89-109.

SPITERY, E., 1984, unpubl. Evolution de l'os occipital chez les Hominidés. Doctorat de 3ème cyle: "Géologie des formations sédimentaires", option : Géologie du Quaternaire et Préhistoire, Université de Provence.

VLCEK, E., 1986. Les Anténéandertaliens en Europe Centrale et leur comparaison avec l'Homme de Tautavel. L'Anthropologie 90, Paris:503-513.

YOKOYAMA, Y., NGUYEN, H.V., FALGUERES, C., BIBRON, R. and LEGER, C., 1991. Datation directe par la spectrométrie gamma non destructive des restes humains: comparaison avec d'autres méthodes. In CNRS, Raynal, J.-P. and Miallier, D., (ed.), Datation et caractérisation des milieux Pléistocènes, Bordeaux:11-17.

ZOLLIKOFER, C., PONCE de LEON, M.S. and MARTIN, R.D., 1998. Computer-assisted paleoanthropology. Evolutionary Anthropology 6:41-54.

ZOLLIKOFER, C.P.E., 2002. A Computational Approach to Paleoanthropology. Evolutionary Anthropology Suppl1:64-67.

HOMINID FOSSILS / LES HOMINIDÉS FOSSILES

Three-dimensional computer imaging of hominid fossils: a new step in human evolution studies

Bertrand Mafart, MD, PhD; Gaspard Guipert, DEA; Marie-Antoinette de Lumley, MD, PhD; Gérard Subsol, PhD

Mafart, Guipert, de Lumley, Subsol — Antenne du Département de Préhistoire du Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris; Mafart — Faculté de Médecine Nord, Marseille, France.

Address for correspondence: Dr. Bertrand Mafart, 160 ave. Jacques Olive, 83000 Toulon, France; fax 33494159827; bmafart@aol.com

Submitted Mar. 30, 2004 Accepted May 17, 2004

Can Assoc Radiol J 2004;55(4):264-70.

Radiographic techniques have been used in paleoanthropology and comparative anatomy since the discovery of x-rays, and each leap of medical imaging technology has been accompanied by new applications in both fields. As early as 1906, that is, only 10 years after their discovery by W.K. Roentgen, x-rays were used to study the remains of a Neanderthal hominid found in Croatia.¹ However, the validity of conventional radiography for the study of fossilized human skeletons remains limited because of mineralization or the presence of sedimentary matrix, or both.²

The rapid development of medical imaging in the 1980s was quickly followed by applications in the field of paleontology.³ However, it was the use of computed tomographic (CT) imaging in combination with 3dimensional (3D) digital technology that paved the way for the revolution in paleoradiology.^{4,7} Indeed, CT imaging made it feasible for the first time to analyze and obtain images of the endocranium, sinus cavities and inner ear embedded in soil matrix, which had not been identified on x-ray films,^{7,8} enabling restitution of missing pieces, with minimal handling of extremely fragile specimens. In the last 10 years or so, radiologists, computer scientists and paleoanthropologists in the United States and Europe have formed multidisciplinary teams to study hominoid fossils using these virtual techniques. The first virtual paleoanthropology meeting took place in Liège, Belgium, in 2001.⁹ Although not devoid of technical and ethical problems, this technology has opened a new era in the study of human fossils.^{10,11}

3D CT IMAGING OF FOSSILS

Paleontological studies require high-resolution anatomical reconstruction. The evaluation of virtual and morphometric anatomy should be as accurate as direct examination of the original fossils (Fig. 1). Highdefinition industrial CT scanners provide such resolution (0.01 mm). Unfortunately, because of the small size of their

acquisition chamber, these scanners can only be used for small anatomical specimens.^{12,13}

Several factors can hinder the acquisition of CT images of fossil specimens.^{14,15} Because of the process of diagenesis during fossilization and the geochemical features of the surrounding sediment, bone density may be greater than in life (> 3500 Hounsfield units [HU]), either uniformly or variably (Fig. 2). Scanning parameters used in clinical settings are usually unsuitable, and specific adjustment is necessary for each specimen.¹⁴

Cavities within the specimen often contain sediment and air. The density of the sediment matrix is variable and may be either greater than or similar to that of the bone itself. Partial volume effects may be observed at the interface with air. The window setting must be calibrated based on the mean values of the fossilized bone and on threshold effects so as to refine the boundaries between the bone and sediment, on the one hand, and between the bone and air, on the other. In early experience with CT imaging of fossil specimens, manual outlining of each slice was performed to separate the bone from the soil matrix, and then 3D reconstruction was carried out using the outlined sections.¹⁶ Current software and acquisition of fine sections have eliminated the need for manual outlining by allowing automatic delineation of the bone from surrounding sediment using grey scale analysis.^{14,17}

Image processing has been greatly simplified by the use of 3D imaging software packages, developed specifically for paleontological applications (e.g., Mimics and Magics). The most common method of 3D imaging is surface rendering, a 3-step process consisting of segmentation, interpolation and illumination by means of 1 or more virtual light sources. The fossil image can be rotated in virtual space, and distances and angles can be measured. In addition to this virtual display, digital 3D data sets provide the basis for the building of stereolithographic models using transparent resin that allows not only the depiction of the outer skull surface but also of internal anatomical details that are not seen in normal fossils.¹

3D CT IMAGING IN PALEONTOLOGICAL RESEARCH

Study of brain evolution using human fossil specimens

Increasing complexity of brain structures is a cardinal feature of human evolution. Cranial volume and the imprint pattern of brain convolutions are important data for the study of this process. Until recently, because of the state of conservation of fossils or the presence of intracranial rock matrix, the only way to study the interior skull morphology was to create an endocranial cast called an endocast. Using 3D CT imaging, an *Australopithecus* skull from the Makapansgat site, South Africa, was reanalyzed. Values for its endocranial capacity were found to be lower than previous estimates.¹⁸ Since then, cranial volume estimates of fossils have been systematically reassembled using 1-mm sections. 3D imaging has been used to reconstruct the missing parts of these skulls by comparison with direct measurement (Fig. 3).^{19,20}

Study of facial sinuses and the inner ear

Little was known about pneumatization of the frontal and maxillary sinuses in nonhuman primates and hominoid fossils because of researchers' reluctance to break up skull specimens. 3D imaging (Fig. 4)²¹ has made this destructive approach obsolete. Using this method, the development of the frontal sinus and its relation with the postorbital bar in fossils preceding *Homo sapiens* has been analyzed.²² Findings show that maxillary sinus size correlates well with craniofacial size in all primates and in humans.²³ The phyletic position of some fossil primates has been accurately defined by studying the ethmoidal sinus measurement.²⁴

The relation of verticalization of the head with acquisition of a permanent upright 2-legged posture, morphological evolution of the skull and morphology of the inner ear is complex.²⁵⁻²⁷ Visualization of these intraosseous structures has been feasible only since the advent of CT imaging. Analysis of 3D reconstructions provides new evidence supporting speciation.²⁷⁻²⁹

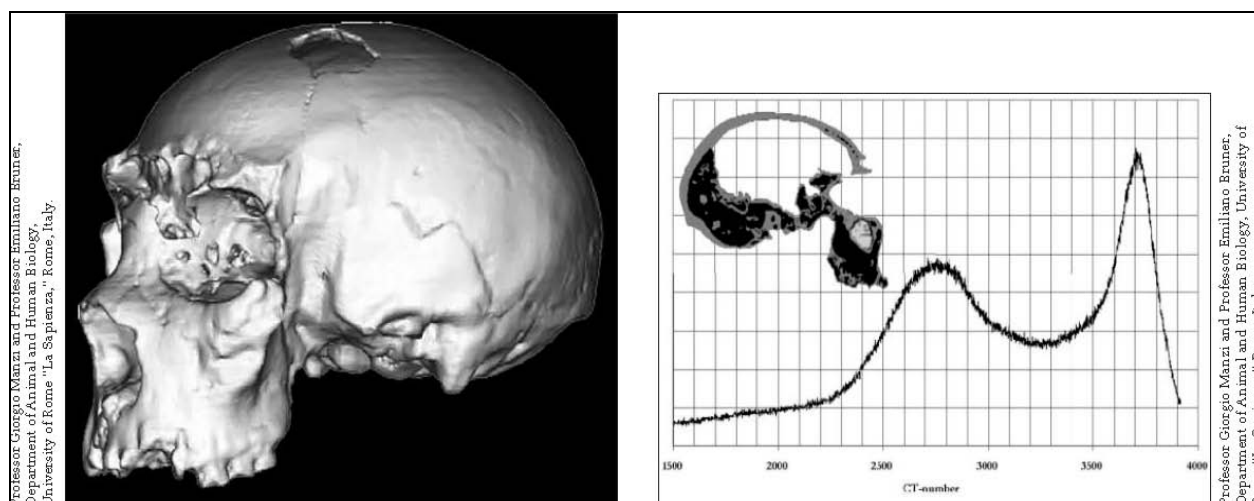


FIG. 1: Complete virtual reproduction of the Saccopastore 1 skull, Italy (ca. 120 000 BC). This specimen is housed in the Museum of Anthropology “Guiseppe Sergi,” Department of Animal and Human Biology, University of Rome “La Sapienza,” Rome, Italy.

FIG. 2: Attenuation spectrum (pixels per computed tomography [CT] numbers) of Saccopastore 1 shows a bimodal distribution of density; the left peak (phase 1) corresponds to the fossilized bone and the right peak (phase 2) to the stone matrix.

Reconstruction of fragmented and incomplete fossils

Fossilized hominid skulls are several million years old. During the extremely long taphonomic process that they have undergone, fracture and deformity can occur because of soil movement. Until now, reconstruction has been done manually using various materials (adhesives, plaster, plastic putty) to fill in missing areas. These techniques are not reliable and depend on the quality of the specimen, and serial replication is difficult. Currently, virtual reconstruction guided by computed tomography not only allows testing of every possible configuration but also a comparison with other contemporary fossils to evaluate morphological similarity (Fig. 5, Fig. 6). Virtual reconstruction with the correction of skull defects is also feasible. Rapid prototyping has been used to generate replicas of the various virtual configurations with high accuracy.^{13,30,31}

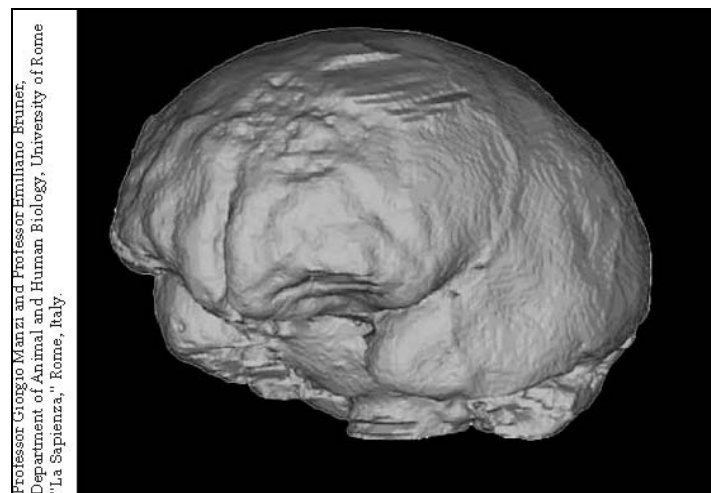


FIG. 3: Virtual endocast of Saccopastore 1.



FIG. 5: Lateral view of the Arago XXI skull, France (ca. 450 000 BC). The face and the right parietal bone are preserved. This specimen is housed in the Centre Européen de Recherches Préhistoriques de Tautavel, France. Skull study in primatology and paleoanthropology

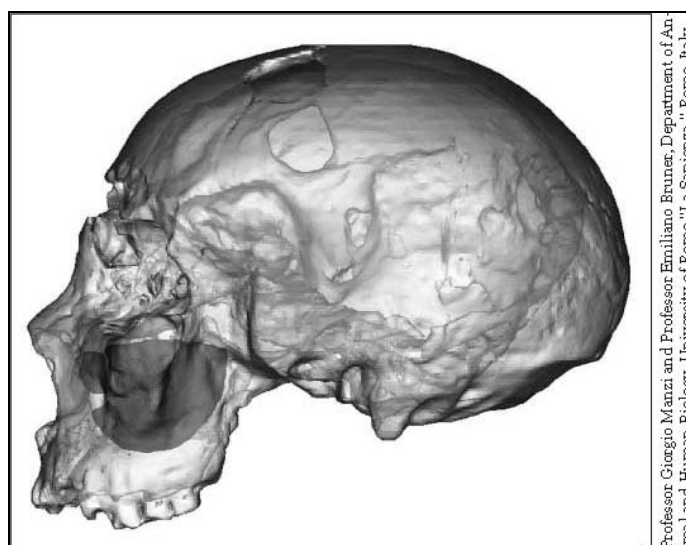


FIG. 4: Virtual reproduction of Saccopastore 1 shows the left maxillary sinus volume.

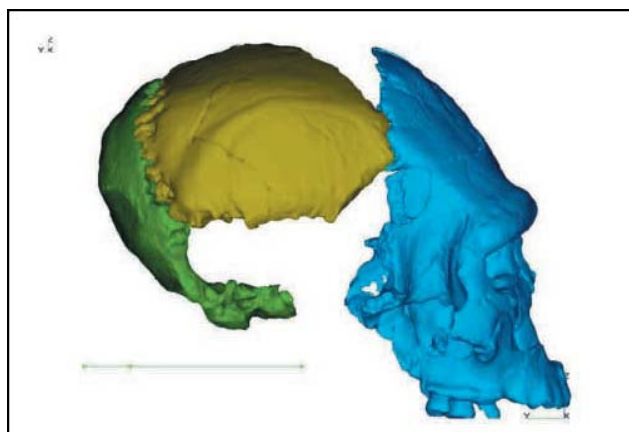


FIG. 6: Hypothetical computer-assisted reconstitution of a European *Homo erectus* skull combining the Arago XXI face after virtual correction of taphonomic changes, the mirror image of the Arago left parietal bone and the Swanscombe skull occipital bone, England (ca. 400 000 BC). This latter specimen is housed in the British Museum, London.

Metric comparison of human fossils has long relied on more or less sophisticated statistical analysis of distance and angle measurements between anatomical landmarks. Recently, geometric morphometry has enabled a more global approach to the analysis of shape differences using techniques such as the Procrustes projection and “thin-plate splines.”³² However, the use of these methodologies is often limited to 2D analysis of CT images or to a variable number of points extracted from 3D images.^{26,33–36} New techniques are now being investigated to evaluate integration of the entire 3D surface of the skull into phylogenetic analysis.^{37–39} This process is expected to be challenging. Technical image analysis will require highly reliable automatic point extraction.

Morphometric analysis will require development of computer codes to align homologous cranial structures and quantify their variations and defects in terms of a reduced number of parameters (Fig. 7, Fig. 8). Analysis of paleoanthropological statistics will require new mathematical tools to model the evolution of anatomical structures and to assist in the differentiation of intraspecies variations from interspecies variations that have significant evolutionary implication. Because of these problems, morphometric analysis of 3D CT images in a global mode, namely, the surface and internal morphology of fossils, is still out of reach. However, it should be emphasized that 3D CT imaging has already allowed comparison of skull ontogenesis between current primates,⁴⁰ Neanderthal remains and *Homo sapiens*.

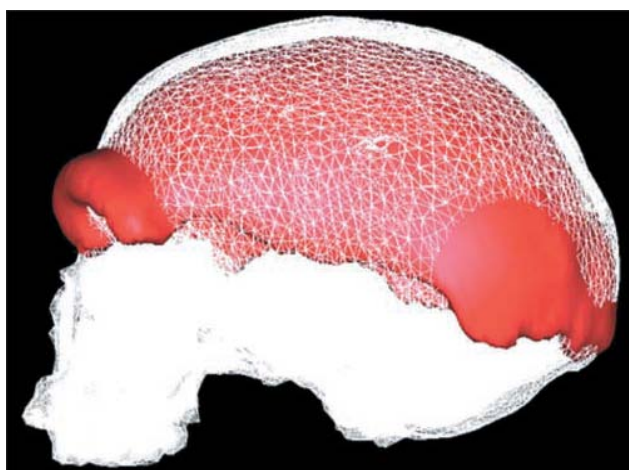


FIG. 7: Comparison of the cranial vault shape of an archaic *Homo sapiens* (Pataud skull, France, which is housed in the Institut de Paléontologie Humaine, Paris) and a *Homo neanderthalensis* (Neanderthal, Germany, which is housed in the Rheinisches Landesmuseum, Bonn). The Pataud skull, which is well conserved, is the white image. The Neanderthal cranium, in red, is longer and less high.

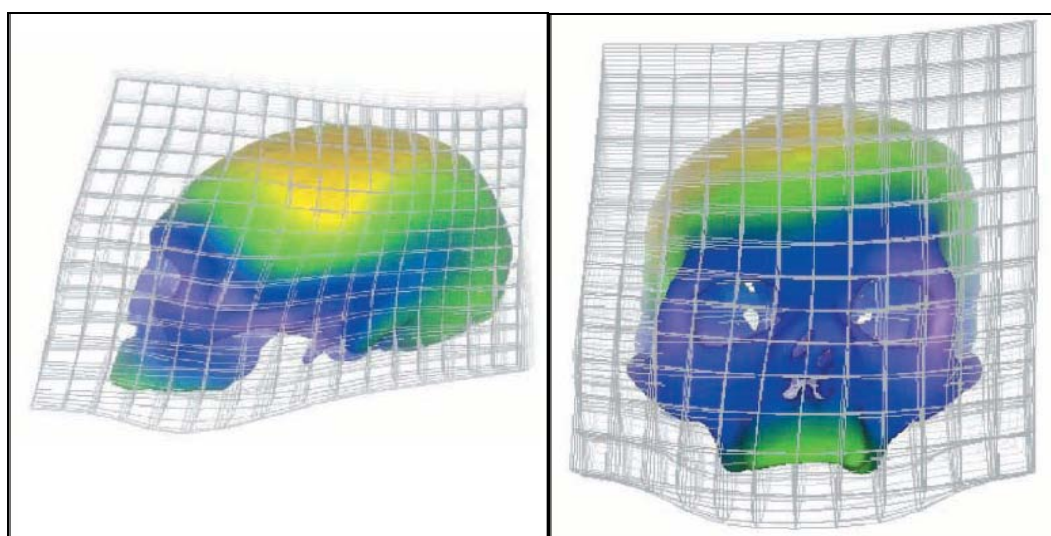


FIG. 8: Frontal (left) and lateral (right) view of a quantitative three-dimensional (3D) display of skull deformity. A comparison between a modern human skull and the Arago skull reconstitution. The 3D CT image of the modern human skull was included in a square matrix for reference. We then computed a 3D transformation based on the feature lines of the Arago skull. This method provides a quantitative overview of the differences between modern humans and *Homo erectus*. The significant frontal dissymetry is the result of taphonomic changes.

Dissemination of scientific knowledge

Dissemination of knowledge to the public is an important responsibility of the scientific community. The study of human evolution lends itself well to scientific popularization, and 3D imaging technology is particularly attractive for the purpose of illustrating the main morphological changes in primates that led to modern humans. Reconstructions using 3D CT images are powerful tools for communication and education (Fig. 9).⁴² As this teaching tool is likely to become more popular, 3D imaging will continue to broaden its scope of application from laboratory analysis to other computer-assisted techniques such as 3D display of archeological sites, paleoclimates, extinct wildlife and the paleoenvironment of prehistoric communities.

Facial reconstruction

Facial reconstruction is essential for the identification of human skeletal remains in forensic medicine. The conventional technique consists of sculpting a face onto a skull by reconstructing muscle and skin using clay or substances with similar properties. The same blend of science and art has been applied to human fossils in order to obtain a more lifelike representation of the facial features. Average skin and muscle thickness determined from 3D images produced from CT data for living subjects have been used to develop computer software that can automatically generate reconstructed facial features.^{43,44} Using this system, it is possible to produce and compare several faces on the same fossil.⁴⁵

WHAT THE FUTURE HOLDS FOR COMPUTER-ASSISTED 3D IMAGING IN PALEOANTHROPOLOGY

The development of imaging technology has facilitated virtual reproduction of fossil specimens using computer-assisted 3D reconstruction. Some investigators have advocated free access to the databases of CT imaging of hominid fossils.⁴⁶⁻⁴⁸ The Institute for Anthropology of the University of Vienna has made 3D CT data from 4 hominoid fossilized skull specimens available to all researchers. This universal access is beneficial to the entire paleoanthropology community but raises the issue of intellectual property rights. Until recently, imaging studies have been carried out on either cast models or, more rarely, on original specimens stored in museums or scientific institutions, located mainly in Africa in the case of the oldest specimens. Local researchers have been granted exclusive study rights within the framework of scientific partnership programs. Because there is a considerable time lag between the discovery of the fossils and the publication of the specimen, there has been a call for a “glasnost in paleoanthropology.”⁴⁷ Gerhard Weber has suggested that funding agencies should require open access to fossils after a certain period, either in the form of images on the Web or on CD-ROM.⁴⁶

CONCLUSION

The use of 3D imaging in the study of human evolution has just started. Progress in imaging technology and 3D image processing will provide paleoanthropologists with high-resolution virtual images of hominid fossils. Digital images will be acquired, stored and easily retrieved for analysis. In the very near future, 3D volume rendering and computer-assisted analysis of fossils will become the major tools for paleoanthropology studies.



FIG. 9: Computer-assisted paleoanthropology used as an educational tool to compare *Homo erectus* and *Homo sapiens* skulls.

ACKNOWLEDGEMENTS: We express our sincere gratitude to Professor Giorgio Manzi and Professor Emiliano Bruner, Department of Animal and Human Biology, University of Rome “La Sapienza,” for allowing us to use images from their work on the Saccopastore 1 skull specimen.

The authors are currently working within the framework of the FOVEA project (<http://foveaproject.free.fr>) supported by the Société de l’information of the Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

REFERENCES

1. Gorganovic-Kramberger D. *Der diluviale mensch von Krapina in Kroatien: ein beitrag zur paläoanthropologie*. Wiesbaden: Kreidel; 1906.
2. Tobias PV. Re-creating ancient hominid virtual endocast by CT-scanning. *Clin Anat* 2001;14:134-41.
3. Tate J, Cann CE. High-resolution computed tomography for the comparative study of fossils and extant bone. *Am J Phys Anthropol* 1982;58(1):67-73.
4. Wind J. Computerized x-ray tomography of fossil hominid skulls. *Am J Phys Anthropol* 1984;63:265-82.
5. Wind J, Zonneveld FW. Computed tomography of an *Australopithecus* skull (Mrs Ples): a new technique. *Naturwissenschaften* 1989;76:325-7.
6. Zonneveld FW, Wind J. High-resolution computed tomography of fossil hominid skulls: a new method and some results. In: Tobias PV, editor. *Hominid evolution: past, present and future*. New York: Alan R. Liss; 1985. p. 427-36.
7. Zonneveld FW, Spoor CF, Wind J. The use of CT in the study of the internal morphology of hominid fossils. *Medicamundi* 1989;34:117-28.
8. Conroy GC, Vannier MW. Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography. *Science* 1984;226:456-8.
9. Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in paleoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 108.
10. Bruner E, Manzi G. Towards a re-appraisal of the Early Neolithic skeleton from Lama dei Peligni (Abruzzo, Italy). Computed tomography and 3D reconstruction of the cranium. *Riv Antro* 2003;81:69-78.
11. Bräuer G, Gröndén C, Gröning F, Kroll A, Kupczik K, Mbua E, et al. Virtual study of the endocranial morphology of the matrix-filled cranium from Eliye Springs, Kenya. *Anat Rec* 2004;276A(2):113-33.
12. Shibata T, Nagano T. Applying very high resolution microfocus X-ray and 3-D reconstruction to the human auditory apparatus. *Nat Med* 1996;2:933-5.
13. Thompson JL, Illerhaus B. A new reconstitution and analysis of the Le Moustier 1 skull and investigation of internal structure using 3-D-mCT data. *J Hum Evol* 1998;35:647-65.
14. Spoor CF, Jeffery N, Zonneveld F. Using diagnostic radiology in evolutionary studies. *J Anat* 2000;197:61-76.
15. Zonneveld FW. Applications and pitfalls of CT-based 3-D imaging of hominid fossils. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in paleoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 5-9.
16. Conroy G, Vannier MW, Tobias PV. Endocranial features of *Australopithecus africanus* revealed by 2- and 3-D computed

- tomography. *Science* 1990;247:838-41.
17. Spoor CF, Zonneveld F. CT-based 3-D imaging of the hominid fossils, with notes on internal feature of the Broken Hill 1 and SK 47 crania. In: Koppe T, Nagai H, Alt KW, editors. *The paranasal sinuses of higher primates: development, function and evolution*. Quintessenz: Berlin; 1999. p. 207-26.
18. Seidler H, Weber GW, Stringer C, Wilfing H, Mueller G, Zur Nedden D, et al. A comparative study of stereolithography modeled skulls of Petralona and Broken Hill: implications for future studies of middle Pleistocene hominid evolution. *J Hum Evol* 1997;33:691-703.
19. Conroy GC, Weber GW, Seidler H, Tobias PV, Kanc A, Brunsden B. Endocranial capacity in an early hominid cranium from Sterkfontein, South Africa. *Science* 1998; 280:1730-1.
20. Conroy G, Weber W, Seidler H, Recheis W, Zur Nedden D, Mariam JH. Endocranial capacity of the Bodo cranium determined from three-dimensional computed tomography. *Am J Phys Anthropol* 2000;113:111-8.
21. Bruner E, Manzi G. The virtual replica of Nazlet Khader, Egypt. Cranium and mandible: first results. In: Vermeersh P, editor. *Paleolithic quarrying sites in Upper and Middle Egypt*. Leuven, Belgium: Leuven University Press; 2002. p. 337-45.
22. Manzi G, Bruner E, Caprasecca S, Gualdi G, Passarello P. CT-scanning and virtual reproduction of the Saccopastore Neandertal crania. *Riv Antro* 2001;79:61-72.
23. Rae T, Koppe T. 3D imaging and measurement in studies of cranial pneumatization. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in palaeoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 11-6.
24. Rossie J, Simons EL, Gauld SC, Rasmussen DT. Paranasal sinus anatomy of Aegyptopithecus: implications for hominoid origins. *Proc Natl Acad Sci USA* 2002;99 (12):8454-6.
25. Spoor F, Wood B, Zonneveld F. Implication of early hominid labyrinthine morphology for the evolution of human bipedal locomotion. *Nature* 1994;369:645-8.
26. Bookstein F, Gunz P, Mitteroecker P, Prossinger H, Schaefer K, Seidler H. Cranial integration in *Homo*: singular warps analysis of the midsagittal plane in ontogeny and evolution. *J Hum Evol* 2003;44(2):167-87.
27. Spoor F, Zonneveld F. A comparative review of human bony labyrinth. *Am J Phys Anthropol* 1998;41:211-51.
28. Hublin JJ, Spoor F, Braun M, Zonneveld F, Condemi S. A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts. *Nature* 1996;381:224-6.
29. Spoor F, Hublin JJ, Braun M, Zonneveld F. The bony labyrinth of Neanderthal. *J Hum Evol* 2003;44:141-65.
30. Ponce de León M, Zollikofer CPE. New evidence from Le Moustier 1: computer-assisted reconstruction and morphometry of the skull. *Anat Rec* 1999;254:474-89.
31. Guipert G, Subsol G, Jessel JP, Delingette H, Mafart B. The FOVEA Project. A new look at human past. *Proceedings of the Ninth International Conference on Virtual Systems and Multimedia*; 2003 Oct 15-17; Montréal: International Society on Virtual Systems and Multimedia; 2003. p. 42-8.
32. Bookstein F. *Morphometric tools for landmark data*. Cambridge: Cambridge University Press; 1991.
33. Bookstein F, Schaefer K, Prossinger H, Seidler H, Fieder M, Stringer C, et al. Comparing frontal cranial profiles in archaic and modern homo by morphometric analysis. *Anat Rec* 1999;257(6):217-24.
34. Weber W, Kim J, Neumaier A, Magori CC, Saanane CB, Recheis W, et al. Thickness mapping of the occipital bone on CT-data: a new approach applied on OH 9. *Acta Anthropol Sinica* 2000;19(Suppl):37-46.
35. Penin X, Berge C, Baylac M. Ontogenic study of the skull in modern humans and the common chimpanzees: neotenic hypothesis reconsidered with a tridimensional Procrustes analysis. *Am J Phys Anthropol* 2002;118:50-62.
36. Bruner E, Manzi G. The "virtual" endocast of Saccopastore 1. General morphology and preliminary comparisons by geometric morphometrics. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in paleoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 17-24.
37. Zollikofer C, Ponce de Leon MS, Martin RD, Stucki P. Neandertal computer skulls. *Nature* 1995;375:283-5.
38. Zollikofer C, Ponce de Leon MS. Virtual paleoanthropology: the 4th dimension. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in palaeoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 47-53.
39. Subsol G, Mafart B, Silvestre A, de Lumley MA. 3D image processing for the study of the evolution of the shape of the human skull. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in palaeoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 37-45.
40. Zumpano M, Richtsmeier JT. Growth-related shape changes in the fetal craniofacial complex of humans (*Homo sapiens*) and pigtailed macaques (*Macaca nemestrina*): a 3D-CT comparative analysis. *Am J Phys Anthropol* 2003;120:339-51.
41. Ponce de León MS, Zollikofer CP. Neandertal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity. *Nature* 2001;412:534-8.
42. Mafart B, Méline D, Silvestre A, Subsol G. Imagerie 3D et paléontologie : les différences de forme entre le crâne de l'Homme Moderne et de l'Homme de Tautavel. Le Chesnay, France: Institut National de Recherche Informatique et en Automatique; 1999. Available: www.inria.fr/multi-media/Vidéotheque/0-Fiches-Videos/451-fra.html (accessed 2004 July 6).
43. Quatrehomme G, Cotin S, Subsol G, Delingette H, Garidel Y, Grevin G, et al. A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models. *J Forensic Sci* 1997;42(4):647-50.
44. Subsol G, Quatrehomme G. Automatic 3D facial reconstruction by feature-based registration of a reference head. In: Marks MK, Clement JG, editors. *Computer graphics facial reconstruction*. Academic Press. In press.
45. Odin G, Quatrehomme G, Subsol G, Delingette H, Mafart B, de Lumley MA. Comparison of a three-dimensional and a

- computerized assisted method for cranio-facial reconstruction: application to Tautavel man. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Three-dimensional imaging in palaeoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 67-9.
46. Gibbons A. Paleoanthropology. Glasnost for hominids: seeking access to fossils. *Science* 2002;297(5586):1464-8.
47. Weber G. Virtual anthropology (VA): a call for glasnost in paleoanthropology. *Anat Rec* 2001;265:193-201.
48. Weber G. Virtual anthropology-the hope for more transparency in paleoanthropology, in three-dimensional imaging. In: Mafart B, Delingette H, editors. *Palaeoanthropology and prehistoric archaeology*. Oxford: British Archaeological Report International Series 1049; 2002. p. 63-6.

Evolution de l'os frontal d'*Homo heidelbergensis* et *Homo neanderthalensis* et comparaison avec l'homme moderne

Evolution of the frontal bone of *Homo heidelbergensis* *Homo neanderthalensis*, comparison to modern Man

Gaspard GUIPERT, Bertrand MAFART

Antenne du Département de Préhistoire du Muséum National d'Histoire Naturelle, Géosciences de l'Environnement, Cerege, Europole Méditerranéen de l'Arbois, 13545, Aix en Provence, Cedex 04.

Email: gaspard_guiPERT@hotmail.com

Current address : 3 Place Baussane, 13015 Marseille, France

MOTS CLES: Os frontal; *Homo heidelbergensis*; Europe; *Homo neanderthalensis*; Analyses Procustes;

KEY WORDS: Frontal bone; *Homo heidelbergensis*; Europe; *Homo neanderthalensis*; Procustes analysis.

Running Title: **Evolution of the frontal bone of european fossil hominids, comparison to modern Man**

RESUME / ABSTRACT

Avant *Homo neandertalensis* différents types d'Hominidés occupèrent l'Europe dont *Homo heidelbergensis*. L'objet de cette étude était de rechercher par une analyse morphométrique du frontal les variations entre ces deux espèces d'une part, et entre ces espèces et l'homme moderne d'autre part. L'étude a porté sur 36 frontaux d'hommes fossiles européens (10 *Homo heidelbergensis*, 26 *Homo neandertalensis*) et un échantillon de 60 individus modernes d'une nécropole historique française. Deux méthodes ont été associées : une étude métrique et des superimpositions Procustes. Une évolution vers un aplatissement et élargissement de l'écaille frontale et un arrondissement des cavités orbitaires chez *Homo neandertalensis* par rapport à *Homo heidelbergensis* a été mise en évidence. Cette étude ne permet pas de trancher

entre cladogenèse ou anagenèse lors de la transition *Homo heidelbergensis* – *Homo neandertalensis* en Europe, mais démontre une nette différence dans le plan d'organisation de l'os frontal entre ces espèces et surtout vis-à-vis de l'Homme moderne.

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, l'os frontal a été l'objet d'un regain d'intérêt dans les travaux scientifiques (Semendeferi *et al.* 1997, Bookstein *et al.* 1999, Nambiar *et al.* 1999, Sladek *et al.* 2002, Baaten *et al.* 2003). Os de transition entre la face et le neurocrâne, le frontal protège la zone antérieure du cerveau qui n'en est séparé que par les méninges. Les aires corticales frontales sont essentielles pour les processus cognitifs humains et notamment pour le comportement social, la personnalité, le langage et l'abstraction (Lewin 1984, Habib *et al.* 2000). L'étude de l'évolution morphologique de l'os frontal chez les hommes fossiles présente donc un grand intérêt phylogénique. Cependant, la morphologie de la face exocrânienne de l'os frontal ne peut être assimilée à celle de la face endocrânienne dont la concavité n'aurait que peu varié entre les espèces humaines fossiles (Bookstein *et al.* 1999). L'évolution du frontal s'inscrit dans la dynamique de l'évolution générale du crâne dont il est une composante indissociable même si son analyse comme os isolé est d'un grand apport.

Le développement continu des techniques d'analyse tridimensionnelle à partir notamment de coupes de scanners médicaux (Zollikofer 2002, Mafart 2002, Mafart *et al.* 2004), et des méthodes de superimposition Procruste, est à l'origine de nouvelles approches méthodologiques en paléanthropologie. Elles permettent des localisations spatiales des points de repères et des analyses morphométriques à partir d'images virtuelles.

La plupart des travaux antérieurs utilisant des méthodes d'analyses tridimensionnelles sont basées sur un nombre réduit de points craniologiques. Ainsi, le frontal est analysé dans le plan sagittal à partir de 3 points (bregma, glabella, nasion) associés à trois autres points sagittaux extra frontaux l'opisthion, l'inion, le lambda (Millet 2000, Penin *et al.* 2002). Lorsqu'un plus grand nombre de points sont utilisés, permettant par exemple la modélisation de la courbure de l'écaille frontale, les effectifs étudiés sont réduits et/ou les fossiles étudiés sont dispersés dans le temps et l'espace (*Australopithecus*, *Homo habilis*, *Homo erectus* asiatiques...) (Bookstein *et al.* 1999, Detroit 2000). D'autres travaux méthodologiquement comparables ont concernés des primates non humains (Penin, Baylac 1999).

Les caractéristiques morphologiques de l'os frontal d'*Homo neandertalensis* ont été analysées dans de nombreux travaux (Heim, 1986) ; L'analyse de l'évolution ontogénique du crâne et donc du frontal de ces hommes fossiles a bénéficié de l'apport de l'imagerie 3D

(Ponce de Leon, Zollikofer 2001) mais peu de travaux furent entrepris d'un point de vue de dynamique évolutive.

L'analyse d'un os isolé est certes réducteur par rapport à une analyse morphométrique crânienne complète mais présente plusieurs avantages attestés par des travaux récents (Harvati, 2001). Le nombre de crânes complets d'hommes fossiles du Pléistocène est réduit. Lorsqu'ils sont conservés, la plupart ont subi des fracturations et des déformations dans les sédiments et ont dû faire l'objet de reconstitution. Le caractère robuste de l'os frontal en fait un des os les mieux conservé. Enfin, cet os protège des aires cérébrales dont les fonctions ont joué un rôle déterminant dans l'évolution cognitive du genre *Homo*.

L'objectif était d'analyser l'apparition des caractères autapomorphiques du frontal néandertalien par comparaison aux *Homo heidelbergensis*, avec un référentiel anatomique moderne en analysant la variation morphologique de la zone orbitaire et de l'écaille dans un premier temps entre ces espèces, puis entre ces espèces et l'Homme moderne (i) par une méthode métrique et (ii) par une méthode Procuste.

MATERIEL

L'étude a été réalisée sur les moulages de 10 os frontaux d'*Homo heidelbergensis* d'Europe et du Moyen-Orient datant de moins de 200 000 ans BP, 26 *Homo neandertalensis* de la même aire géographique (Table 1). L'échantillon moderne est constitué de 60 crânes complets d'adultes du cimetière historique de Notre-Dame-du-Bourg, à Digne, daté du 11ème au 18ème siècle, France (Alpes-de-Haute-Provence). Il comprend 30 hommes et 30 femmes (détermination du sexe selon Bruzek, 2002) exempts de pathologies crâniennes macroscopiquement décelables.

[Table 1]

METHODE

Méthode métrique directe

Les mesures ont été prises avec un pied à coulisse électronique de 300 mm avec une précision de ± 0.04 mm. Nous avons utilisé un craniophore cubique ainsi qu'un dioptographe pour tracer les profils, contours et angles, puis pour relever les coordonnées spatiales des points structures anatomiques.

Les caractères métriques étudiés (Martin, Saller, 1957) sont les suivants : **M9**: largeur frontale minimale; **M10**: largeur frontale maximale; **M10b**: diamètre bistéphanique St-St; **M26**: arc frontal Na-B; **M26(2)**: arc frontal Sg-Na; **M29**: corde frontale Na-B; **M29(2)**: corde frontale Sg-Na; **M43**: largeur biorbitaire externe Fmt-Fmt; **M43'**: largeur maximale de la crête crânio-faciale; **M43(1)**: largeur biorbitaire interne Fmo-Fmo; **M50**: largeur antérieure inter-orbitaire MF-MF; **MCI**: épaisseur moyenne des extrémités internes droite et gauche de la crête crânio-faciale; **MCA**: moyenne droite et gauche de l'épaisseur minimale de la crête crânio-faciale; **MCE**: épaisseur moyenne des extrémités externes droite et gauche de la crête crânio-faciale (Paturet, 1951); **MP**: moyenne de la corde Fmo-Fmt sur la face latérale des processus zygomatiques gauche et droit; **I12a**: Indice stéphanique de Martin ($M9/M10b \times 100$); **I22**: indice de courbure ou courbure frontale de Martin ($M29/M26 \times 100$); **I72'**: variante de l'indice de contraction post-orbitaire de Martin ($M9/M43' \times 100$); **M32(5)**: angle de la courbure frontale Na-F-B (en °).

L'analyse statistique a associé la comparaison des moyennes et l'analyse de leur variance par un test ANOVA (Table 4) avec un seuil conventionnel de significativité de 0.05. En cas de différence significative globale entre les trois échantillons, des tests de Bonferroni par couple ont été effectués pour identifier les échantillons qui diffèrent significativement au même seuil de 0.05.

[Table 2; Table 3]

Etude Procuste

L'étude Procuste a été réalisée à partir de 11 points de repères en *norma lateralis* (Table 2) et 33 points en *norma frontalis* (15 avec leur symétrique et 3 points uniques; Table 3). Trois logiciels ont été utilisés sous Windows 2000[®]: APS, ConcatX, DigitX (Penin, 2001a,b,c).

Les points analysés ont été enregistrés dans un plan cartésien avec DigitX à partir des profils crâniens préalablement numérisés. Deux groupes ont été établis (5 *Homo heidelbergensis*; 10 *Homo neandertalensis*) avec ConcatX de manière à les comparer en utilisant APS. La première étape a consisté à superposer l'ensemble des individus appartenant aux deux groupes. Les résultats de cette superimposition (résidus Procrustes) ont été utilisés comme base pour l'analyse intergroupe. Nous avons ensuite comparé la moyenne des deux populations grâce aux vecteurs représentant les changements de conformation entre les deux groupes. Le même type d'analyse fut réalisé successivement pour les deux populations fossiles comparées aux individus modernes.

RESULTATS

Mesures métriques et statistiques (Table 4)

Analyse des différences de moyenne

Sur les 19 moyennes testées avec ANOVA, 14 montrent une différence de moyenne statistiquement significative ($p < 5\%$) entre les trois populations. Cependant, le test de Bonferroni n'objective pas de différences significatives ($p < 5\%$) entre les moyennes des *Homo heidelbergensis* et des *Homo neandertalensis*, excepté pour la corde frontale (M29), l'indice de courbure (I22) et l'indice de contraction post-orbitaire (I72'). Il ne s'agit donc que de tendances pour les autres caractères. En particulier, les valeurs de la largeur frontale maximale (M10) et de l'arc frontal (M26) ne présentent pas de différence de variance statistiquement significative. A l'exception du diamètre bistéphanique, de la corde frontale (M29) et de l'indice de courbure (I22), les populations fossiles présentent systématiquement des moyennes significativement différentes de celles des Hommes modernes.

[Table4]

La zone sus-orbitaire et les orbites.

Par comparaison aux *Homo heidelbergensis*, la moyenne de l'épaisseur minimale de la crête crânio-faciale (MCA) d'*Homo neandertalensis* est moindre tandis que les épaisseurs moyennes des extrémités internes droite et gauche de la crête crânio-faciale sont plus fortes (MCI et MCE). La zone sous-orbitaire néandertalienne est donc moins épaisse au milieu des arcades. En parallèle, les largeurs (biorbitaire (M43), maximum (M43'), interne (M43 (1))) dans cette région ont tendance à être plus faibles sans que cela ne soit statistiquement significatif (Test de Bonferroni, $p = 0,149$, $p = 0,141$ et $p = 0,546$). En conséquence, la largeur de la cavité orbitaire tend à diminuer (M43; Moyenne *Homo heidelbergensis* = 123,2 mm; Moyenne Néandertal = 118,8 mm), en dépit de la réduction de l'espace inter-orbitaire M50 (valeur de M50 à opposer à M43(1), même si aucune d'entre elles ne sont significatives). La largeur de l'arête au niveau de la jonction fronto-malaire (MP) tend à diminuer ($p = 0.429$) (Figure 1).

[Figure 1]

L'écaille.

L'élargissement de l'écaille frontale est analysé grâce aux largeurs M9, M10 et M10b et à l'indice I12a (divergence de l'écaille). L'os frontal néandertalien diverge plus postérieurement que celui des *Homo heidelbergensis* en raison d'une moindre proportion de la largeur frontale (M9) comparée au diamètre bistéphanique (M10b). Cette croissance chez les néandertaliens de la valeur de M9, associée à la réduction de la largeur maximale de la crête crânio-faciale (M43'), contribue à limiter l'aspect de la constriction post-orbitaire, comme l'indique l'accroissement de la valeur de la variante de l'indice de contraction post-orbitaire de Martin (I72'; $p < 10^{-4}$). Dans la population historique, M9 est plus faible mais avec une largeur M10 forte, formant ainsi une écaille très divergente (*Homo neandertalensis*: M9 = 107,2 mm, M10b = 116,3 mm, gain = +9,1 mm; Modernes: M9 = 97,0 mm, M10b = 120,4, gain = +13,4 mm).

L'indice de courbure I22 plus grand indique un frontal néandertalien plus aplati que celui des *Homo heidelbergensis* et celui des Hommes modernes en raison d'une moindre croissance de l'arc frontal sagittal (M26) par rapport à celle de la corde (M29). L'os frontal néandertalien apparaît plus aplati que celui des individus modernes en raison de la courte corde M29 de ces derniers. La tendance croissante des valeurs de l'arc et de la corde (M26(2) et M29(2)) prises depuis le point supraglabellaire correspond à un allongement de l'écaille frontale.

[Figure 2]

Analyse par méthode Procuste

Les superimpositions des groupes d'*Homo heidelbergensis*, des néandertaliens et des Hommes modernes isolés, ont montré une homogénéité de l'architecture frontale des individus de chaque population. Dans les trois cas, et quel que soit l'axe étudié, les nuages de points obtenus furent uniformes (représentation circulaire). Les points de repères comme le stéphanion ont présenté une plus grande variabilité (surtout chez l'Homme moderne), mais ceci semble être du à la difficulté de marquer ce point sur certains fossiles et encore plus sur la population historique. Aucun autre point de repère étudié n'était distant de ses homologues. Les points de repères correspondant à la zone des arcades orbitaires sont relativement stables. Les superpositions indiquent, pour les trois populations, un centre d'équilibre de l'os frontal se situant sagittalement dans un triangle point supraglabellaire – point fronto-temporal (largeur minimale) – point F.

Les résidus Procustes issus de ces trois superimpositions ont ensuite été utilisés comme base pour l'analyse intergroupe. Ces ensembles furent superposés deux à deux au

moyen de leur point d'équilibre. Nous avons comparé les moyennes des deux populations fossiles et des modernes grâce aux vecteurs représentant les changements de conformation entre chaque ensemble.

En *norma frontalis* (Figure 2), l'os frontal néandertalien est plus large au niveau des stéphanions et est plus bas, tout comme le bregma chez cette espèce. L'écaille apparaît plus basse et plus large que celle des *Homo heidelbergensis* étudiés. Le bord supérieur des cavités orbitaires chez les néandertaliens est différent, celui-ci présentant une forme circulaire. Il n'y a plus de dépression glabellaire autant prononcée. L'épaisseur minimale centrale de l'arcade orbitaire des néandertaliens est moindre que celle des *Homo heidelbergensis*. L'Homme moderne présente un aspect très différent avec un bregma plus haut que celui des deux autres, une verticalité de l'écaille entre le stéphanion (lui aussi plus élevé) et le sphénion mais possède une face moins large. L'espace inter-orbitaire est moins large tandis que les épaisseurs des différentes parties des arcades orbitaires sont moindres que dans les populations fossiles. La constriction post-orbitaire est réduite avec une continuité de l'écaille et des arcades.

En *norma lateralis*, l'os frontal néandertalien est plus allongé que celui des *Homo heidelbergensis*. Un aplatissement de l'écaille est observable, tout comme une modification du contour des orbites. L'écaille modélisée est moins courbée et se trouve plus dans la continuité du torus sus-orbitaire. La fosse supraglabellaire n'est quasiment plus distinguishable par rapport à l'os frontal des *Homo heidelbergensis*. La hauteur de cette écaille a diminué, accentuant cet aspect d'allongement de l'os chez les néandertaliens. De plus, la partie supérieure de la cavité orbitaire est plus ouverte avec une avancée de la zone nasion – glabellle et un recul des points fronto-malaires externes et internes. Le nasion est positionné plus antérieurement que chez *Homo heidelbergensis*. Chez l'individu moderne, le frontal apparaît plus compact antéro-postérieurement et plus grand que celui de ces prédécesseurs chronologiques. Le point F est plus relevé que chez les individus fossiles tandis que la dépression supra-glabellaire n'existe plus. La glabellle n'est quasiment plus discernable sur une base d'écaille frontale quasiment verticale.

DISCUSSION & CONCLUSION

Notre objectif était d'analyser les caractéristiques morphologiques de la face externe du frontal des néandertaliens par rapport celui des *Homo heidelbergensis* d'Europe et de les

comparer aux Hommes modernes, en utilisant des données issues d'une analyse métrique et de la modélisation tridimensionnelle de l'os.

Les épaisseurs de l'apophyse orbitaire externe et de la partie interne de la crête crânio-faciale sont plus grandes chez *Homo neandertalensis*. La conjonction de cet épaissement latéral, de la réduction médiane inter-orbitaire, des variations de l'épaisseur de la crête crânio-faciale ainsi que la diminution de sa largeur, contribue à l'apparition d'une autapomorphie. Les orbites néandertaliennes sont plus courbées au niveau frontal que celles des *Homo heidelbergensis* (Arago XXI, Petralona, Sima de los Huesos 5) ainsi que du représentant d'*Homo cepranensis* (Ascenzi *et al.* 1996). La réduction de la largeur de la crête et de la largeur biorbitaire n'est pas associée à une moindre réduction de l'espace inter-orbitaire contribuant aussi à donner un aspect arrondi au niveau du frontal. Le contour orbitaire n'est plus du tout rectangulaire, plus large que haut comme chez ces fossiles. Ces éléments plaident pour l'existence d'un lien entre la variation de l'épaisseur de l'arcade orbitaire et la modification de la forme des orbites au cours du temps.

Ainsi la zone sus-orbitaire diffère en épaisseur, largeur et profondeur chez *Homo neandertalensis*. L'arc sus-orbitaire est moins large, plus épais sur ses bords et plus profond en son centre, dépassant celui des *Homo heidelbergensis* dans le plan sagittal. L'augmentation de la largeur de la fosse sus-orbitaire sépare d'avantage l'arc sus orbitaire de l'écaille frontale. Cette avancée du torus qui a été décrit comme continu, sans dépression glabellaire chez *Homo neandertalensis*, tout comme la forme des arcades, pourrait être liée à la modification des cavités sinusiennes et à la pneumatisation de la face (Heim, 1986).

L'augmentation des valeurs moyennes de la corde (M29) et de l'arc frontal (M26), témoigne de l'allongement de l'écaille du frontal dans le plan sagittal, donnée confirmée par les mesures indépendantes de la section de la crête crânio-faciale et de l'avancée du nasion M29(2) et M26(2). L'allongement résulte de la conservation de l'axe oblique de la suture coronale (antéro-inférieure – postéro-supérieur). Par ailleurs, la glabelle s'avance antérieurement dans le plan sagittal, phénomène apparaissant très tôt chez *Homo neandertalensis* (Figure 2). L'allongement de l'écaille semble lié à un étirement sagittal antérieur et postérieur chez les *Homo neandertalensis* associé à un avancement de l'espace inter-orbitaire.

L'indice I22 des néandertaliens supérieur à celui des *Homo heidelbergensis* traduit un aplatissement de l'écaille d'*Homo neandertalensis* lié à une faible courbure frontale attestée par l'ouverture de l'angle M32(5), un angle Br-F-Sg s'ouvrant plus vers le bas et un angle F-

Sg—plus haut point du torus s’ouvrant plus vers le haut. Le bregma et le point F sont plus bas et distants l’un de l’autre dans le plan sagittal. Ces modifications positionnelles du bregma et du point F pourraient être attribuées à une simple bascule de l’os. Mais la hausse des stéphanions et des sphénions dans ce plan suggère un deuxième mouvement de bascule de la partie inférieure de l’écaille suivant un axe postéro-supérieur. Proportionnellement, chez les *Homo neandertalensis*, le frontal apparaît moins haut et plus compact entre l’écaille et la suture sphénoïde.

Les stéphanions se trouvent dans une position plus élevée par rapport à celle du bregma et s’éloignent l’un de l’autre dans le plan frontal (M10b), induisant une angulation différente au niveau du bregma. L’angle St–B–St’ s’ouvre plus vers le bas chez les *Homo neandertalensis* que chez *Homo heidelbergensis*, conférant un aspect plus plat et large à leur écaille frontale en *norma frontalis*.

Ceci illustre que, dans un contexte isolé le bregma prend des coordonnées spatiales plus basses, modifications qui sont masquées par la réorientation générale du crâne en position anatomique. Il existe un double mouvement avec dans un même temps un développement général de la partie antérieure du crâne vers l’avant et un aplatissement et un étirement en arrière du frontal qui présente ainsi un aspect plus plat.

Les écarts plus importants entre M9 et M10b amplifient la divergence de l’écaille (I12a). En dépit d’une augmentation en valeur absolue des largeurs maximales et minimales (ainsi qu’au niveau des stéphanions), l’os frontal néandertalien apparaît plus divergent que celui de ces prédécesseurs.

[Figure 3]

La comparaison du frontal d’*Homo heidelbergensis* et d’*Homo neandertalensis* (Figure 3), a montré un étirement sagittal de l’os frontal (qui est plus plat et plus large). La position plus haute des sphénions et des stéphanions, plus basse du bregma et l’accroissement de la largeur minimale, contribue à l’apparition de la platycéphalie décrite chez les néandertaliens (Patte 1955, Heim 1986, Trinkaus, Shipman 1993).

L’os frontal néandertalien présente une mosaïque de caractères autapomorphiques et plésiomorphiques. Cette réorganisation générale pourrait être la conséquence de la torsion occipitale (Dambricourt Malasse 1998) au cours de l’ontogenèse. Du fait de sa position médiale entre la face et le neurocrâne, les modifications du frontal pourraient alors refléter l’évolution de la cinétique sphénoïdale (Dambricourt Malasse 1998; Deshayes 1994). Les modifications de l’os frontal peuvent aussi les témoins de la modification du développement

(Grimaud-Herve 1991) avec les variations du bec encéphalique, ou simplement d'une complète réorganisation liée à un nouvel équilibre cérébral (Heim 1986). Pour d'autres auteurs, la face endocrânienne du frontal n'aurait pas évolué avec une conservation du volume et du contour (Bookstein *et al.* 1999, Semendeferi *et al.* 1997). Une analyse tridimensionnelle surfacique interne et externe de l'os frontal permettrait d'étudier plus précisément l'évolution morphologique osseuse frontale et cérébrale antérieure.

Le frontal de l'*Homo sapiens* moderne s'avère très différent dans son architecture. La réduction de l'épaisseur des structures des arcades orbitaires semble être due en partie à la modification de la cavité cérébrale (Grimaud-Herve 1991). Notre espèce est la seule parmi les Hominidés pour laquelle les lobes frontaux se situent au-dessus des cavités orbitaires (Bookstein *et al.* 1999). Tout se passe comme si la base de l'écaille s'était avancée au-dessus de ces cavités. Cet aspect est renforcé par la diminution de la constriction post-orbitaire (I72'). Autre point, le front moderne est bombé sagittalement, semble-t-il pour les mêmes raisons (Grimaud-Herve 1991). Par rapport aux deux espèces fossiles, le bloc orbitaire du frontal est moins large que l'écaille de l'os. Les différentes mesures relevées ainsi que ces caractères, même si ils sont plus significativement différents de ceux des *Homo heidelbergensis* que de ceux des *Homo neandertalensis* dans leur ensemble, nous font dire que si on ne peut exclure un lien de parenté entre les *Homo heidelbergensis* et les *Homo sapiens* actuels, du fait de l'écart temporel avec les fossiles analysés (Tautavel, - 450 000 ans BP ; Yokoyama *et al.* 1991), il ne peut y avoir de lien entre les néandertaliens et les Hommes modernes. En effet, alors que le frontal néandertalien tend à être plus plat et plus large, celui de notre espèce subit une angulation médiane et un accroissement en hauteur accompagné d'une réduction de la profondeur de l'os. La modification des différents rapports de largeurs de la zone orbitaire contribue aussi à cette analyse.

A partir de cette seule analyse du frontal de ces hommes fossiles, il est impossible de trancher entre anagenèse ou cladogenèse pour la spéciation d'*Homo neandertalensis* vraisemblablement à partir de représentant d'*Homo heidelbergensis* en Europe. En revanche, il existe une différence nette entre ces deux espèces fossiles et l'Homme moderne, excluant par cela une filiation entre néandertaliens et les *Homo sapiens* modernes. En effet, on constate entre ces deux groupes une trop grande différence d'organisation spatiale de l'os frontal. Tandis que chez les premiers l'os s'étire antéro-postérieurement, celui-ci diverge fortement et se redresse chez les autres. D'autres modifications comme la forme des arcades orbitaires et

l'avancée de l'écaille frontale au dessus des orbites contribuent aussi à nous faire dire que les deux groupes constituent deux espèces distinctes.

Cette étude montre la complexité de la morphologie et de l'organisation de l'os frontal dans ces espèces fossiles et chez l'homme moderne et donc l'intérêt de l'analyse paléoanthropologique d'os considérés isolément. Cette analyse de l'évolution des os frontaux devra être étendue aux fossiles d'*Homo erectus* asiatiques et africains et aux plus anciens fossiles d'*Homo sapiens*, avec utilisation de méthodes d'analyses tridimensionnelles surfaciques et volumiques à partir notamment d'images scannographiques médicales.

References

- ASCENZI A., BIDDITTU I., CASSOLI P.F., SEGRE A.G., SEGRE-NALDINI E. 1996: A calvarium of late *Homo erectus* from Ceprano, Italy. *Journal of Human Evolution* 31: 409-423.
- BAATEN P. J. J., HADDAD, M. ABI-NADER, K. ABI-GHOSN A., AL-KUTOUBI A., JURJUS A. R. 2003: Incidence of Metopism in the Lebanese Population. *Clinical Anatomy* 16: 148-153.
- BOOKSTEIN F., SCHÄFER K., PROSSINGER H., SEIDLER H., FIEDER M., STRINGER C., WEBER G. W., ARSUAGA J.-L., SLICE D. E., ROHLF F. J., RECHEIS W., MARIAM A. J., MARCUS L. F. 1999: Comparing Frontal Cranial Profiles in Archaic and Modern *Homo* by Morphometric Analysis. *The Anatomical Record (New Anat.)* 257: 217-224.
- BRUZEK J. 2002: A Method for Visual Determination of Sex, Using the Human Hip Bone. *American Journal of Physical Anthropology* 117: 157-168.
- DAMBRICOURT MALASSE A. 1998 : Le rôle de l'embryon dans l'évolution crânienne des *Homo neandertalensis*. In: Association Culture & Patrimoine en Limousin (Ed.): *L'homme de la Chapelle-aux-Saints*. Pp. 33-38.
- DESHAYES M. J. 1994: Morphogenèse crâniofaciale, CD ROM. Actigraph. Real. SID distributeur, Paris.
- DETROIT F. 2000: The Period of Transition between *Homo erectus* and *Homo sapiens* in East and Southeast Asia: New Perspectives by the Way of Geometric Morphometrics. *Acta Anthropologica Sinica* 19 suppl: 62-68.
- GRIMAUD-HERVE D. 1991: L'évolution de l'encéphale chez l'*Homo erectus* et l'*Homo sapiens*. Thèse de docteur d'état es Sciences, Université de Provence.
- HABIB M., JOANETTE Y., ROCH LECOURS A. 2000: Le cerveau humain et les origines du langage. *Médecine/sciences* 16: 171-180.
- HARVATI K. 2002: Models of Shape Variation between and within species and the Neanderthal Taxonomic position: A 3D Geometric Morphometrics Approach Based on Temporal Bone Morphology. In: B. MAFART, H., DELINGETTE (Ed.): *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*. Pp. 25-30. Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, Oxford.
- HEIM J.-L. 1986: Les hommes de Néandertal. In: Doin (Ed.): *L'Homme, son évolution, sa diversité. Manuel d'anthropologie physique*. Pp. 201 – 215. Edition du CNRS, Paris.

- LEWIN R. 1984: Human Evolution - An Illustrated Introduction. W. H. Freeman (Ed.). New York.
- MAFART B. 2002: 3D Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archeology: A New Tool for Old Sciences or an Emerging Science? In: B. MAFART, H. DELINGETTE (Ed.): *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*. Pp. 1-3. Archaeopress, Publishers of British Archaeological Reports, Oxford.
- MAFART B., GUIPERT G., LUMLEY M.-A. de, SUBSOL G. 2004: Three-dimensional computer imaging of hominid fossils: a new step in human evolution studies. *Canadian Association of Radiologist Journal* 55, 4: 264-270.
- MARTIN R., SALLER K. 1957: Lehrbuch der Anthropologie in Systematischer Darstellung mit Besonderer Berücksichtigung der Anthropologischen Methoden. Gustav Fischer Verlag (Ed.) Stuttgart.
- MILLET J.-J. 2000: Analyse du champ morphologique infantile Pan et Gorilla et comparaison avec l'architecture crânienne de Homo. In: P. ANDRIEUX, D. HADJOUIS, A. DAMBRICOURT-MALASSE (Ed.): *L'identité humaine en question. Nouvelles problématiques et nouvelles technologies en Paléontologie humaine et en Paléoanthropologie*. Pp. 67-78. Artcom', Paris.
- NAMBIAR P., NAIDU M. D. K., SUBRAMANIAM K. 1999: Anatomical Variability of the Frontal Sinuses and Their Application in Forensic Identification. *Clinical Anatomy* 12: 16-19.
- PATTE E. 1955: Les Néanderthaliens, Anatomie, Physiologie, Comparaisons. Masson (Ed.). Paris. 560 pp.
- PATURET G. 1951: Ostéologie, Arthrologie - Myologie. Paris.
- PENIN X. 2001a: APS Version 2.3: Logiciel de superposition et d'analyse statistique disponible gratuitement sur internet: <http://www.cpod.com/monoweb/aps>.
- PENIN X. 2001b: ConcatX: Logiciel servant à créer des fichiers de données pour APS, disponible gratuitement sur internet: <http://www.cpod.com/monoweb/aps>.
- PENIN X. 2001c: DigitX Version 1.3: Logiciel de numérisation de points de repère sur des images au format JPEG, BMP ou WMF, disponible gratuitement sur internet: <http://www.cpod.com/monoweb/aps>.
- PENIN X., BAYLAC M. 1999: Comparaison tridimensionnelle des crânes de *Pan* et *Pongo* par superpositions procrustéennes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la vie* 322: 1099-1104.
- PENIN X., BERGE C., BAYLAC M. 2002: Ontogenetic Study of the Skull in Modern Humans and the Common Chimpanzees: Neotenic Hypothesis Reconsidered With a Tridimensional Procrustes Analysis. *American Journal of Physical Anthropology* 118: 50-62.
- PONCE de LEON M. S., ZOLLIKOFER C. P. E. 2001: Neanderthal cranial ontogeny and its implications for late hominid diversity. *Nature* 412: 534-538.
- SEMENDEFERI K., DAMASIO H., FRANK R., van HOESEN GW. 1997: The evolution of the frontal lobes: a volumetric analysis based on three-dimensional reconstructions of magnetic resonance scans of human and ape brains. *Journal of Human Evolution* 32: 375-388.
- SLADEK V., TRINKAUS E., SEFCAKOVA A., HALOUZKA R. 2002: Morphological affinities of the Sal'a 1 frontal bone. *Journal of Human Evolution* 43: 787-815.
- TRINKAUS E., SHIPMAN P. 1993: The Neandertals. Changing the Image of Mankind. A. A. Knopf, New York.
- YOKOYAMA Y., NGUYEN H. V., FALGUERES C., BIBRON R., LEGER C. 1991: Datation directe par la spectrométrie gamma non destructive des restes humains: comparaison avec d'autres méthodes. In: CNRS (Ed.): *Datation et caractérisation des milieux Pléistocènes*. Pp. 11-17. Bordeaux.
- ZOLLIKOFER C. P. E. 2002: A Computational Approach to Paleoanthropology. *Evolutionary Anthropology* 11: 64-67.

<i>Homo heidelbergensis:</i>	<p>Allemagne : Bilzingsleben parts B1 and B2; <u>Steinheim</u></p> <p>Espagne : Sima de los Huesos 4 and 5</p> <p>France : Arago XXI ; La Chaise S16; La Chaise DB 17b</p> <p>Grèce : Petralona</p> <p>Israël : Tabun C1; <u>Zuttiyeh 1</u></p>
<i>Homo neanderthalensis:</i>	<p>Allemagne : Ehringsdorf; Neanderthal</p> <p>Belgique : <u>Spy I</u> and II</p> <p>Croatie : <u>Krapina 3 cranium C</u>, 4, 20 Pa.4, 15; Vindija VI 202, 255, 261</p> <p>France : Fontéchevade H2-E1; Le Moustier; <u>La Quina H5</u>; La Chapelle-aux-Saints ; <u>La Ferrassie 1</u> ; St Césaire 1</p> <p>Gibraltar : Gibraltar 1</p> <p>Irak : Shanidar 1, 4, 5</p> <p>Israël : <u>Amud 1</u></p> <p>Italie : Saccopastore I and II; <u>Circeo 1</u></p> <p>Slovaquie : <u>Šala 1</u></p>

Table 1: Individus étudiés; soulignés, individus étudiés en *norma lateralis*; en gras, ceux étudiés en *norma lateralis* et en *norma frontalis*.

Table 1: Studied individuals; underlined, individuals studied in *norma lateralis*; in bold, those studied in *norma lateralis* and in *norma frontalis*.

Bregma: point de rencontre des sutures coronales et sagittale	B
Point le plus haut de l'écaille entre B et Na	F
Point supraglabellaire : point le plus profond de la fosse supraglabellaire dans le plan sagittal	Sg
Point le plus haut de la crête crânio-faciale par rapport au segment B-Na	
Glabelle : point proéminent entre les torus orbitaires dans le plan sagittal	Gl
Nasion : point de rencontre des sutures nasales et frontales	Na
Point orbitaire supérieur	
Point orbitaire fronto-malaire: point le plus interne de la suture fronto-malaire sur le bord latéral du processus zygomatique	Fmo
Point temporal fronto-malaire: point le plus externe de la suture fronto-malaire sur le bord latéral du processus zygomatique	Fmt

Sphénion: point de rencontre du frontal, du pariétal et du sphénoïde	Sphn
Stéphanion: point de rencontre de la ligne temporale supérieure avec la suture coronale	St

Table 2: Définitions et abréviations des points anatomiques utilisés en vue latérale.
Table 2: Definitions and abbreviations of the anatomical points used in lateral view.

1 Bregma (1)	B
2 Stéphanion (2)	St
3 Point où l'arête latérale se projette sur la crête crânio-faciale (2)	
4 Point où le bord de la facette temporale du frontal se projette sur la crête crânio-faciale (2)	
5 Point intermédiaire correspondant au changement d'orientation de la courbure de la crête crânio-faciale sur son bord extérieur (2)	
6 Le point le plus externe de la crête crânio-faciale (2)	
7 Point fronto-malaire temporal (2)	Fmt
8 Point fronto-malaire orbitaire (2)	Fmo
9 Point correspondant au changement d'orientation de l'arc externe (2)	
10 Point orbitaire supérieur (2)	
11 Point correspondant au changement d'orientation de l'arc interne (2)	
12 Point fronto-maxillaire (2)	MF
13 Point correspondant au premier tiers de la corde (dans le plan vertical) MF-Na (2)	
14 Point correspondant au deuxième tiers de la corde (dans le plan vertical) MF-Na (2)	
15 Nasion (1)	Na
16 Point inférieur de la fosse supraglabellaire dans le plan vertical (1)	
17 Point correspondant au changement d'orientation de la partie interne de la crête crânio-faciale (2)	
18 Plus haut point de la crête crânio-faciale (2)	

Table 3 : Définitions et abréviations des points anatomiques utilisés en vue frontale.
Table 3: Definitions and abbreviations of the anatomical points used in frontal view.

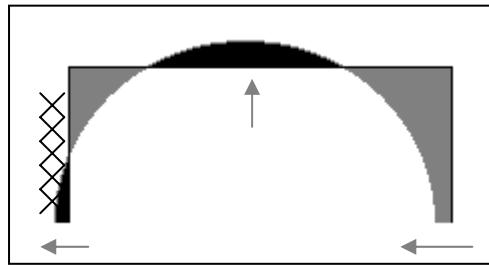


Figure 1: Modifications de la cavité orbitaire gauche durant la néandertalisation ; hachuré : espace inter-orbitaire ; rectangle : contour des *Homo heidelbergensis* ; hémisphère : contour des *Homo neanderthalensis*.

Figure 1: Modifications of the left orbital cavity during neanderthalization; hatched: interorbital space; rectangle: *Homo heidelbergensis* contour; hemisphere: *Homo neanderthalensis* contour.

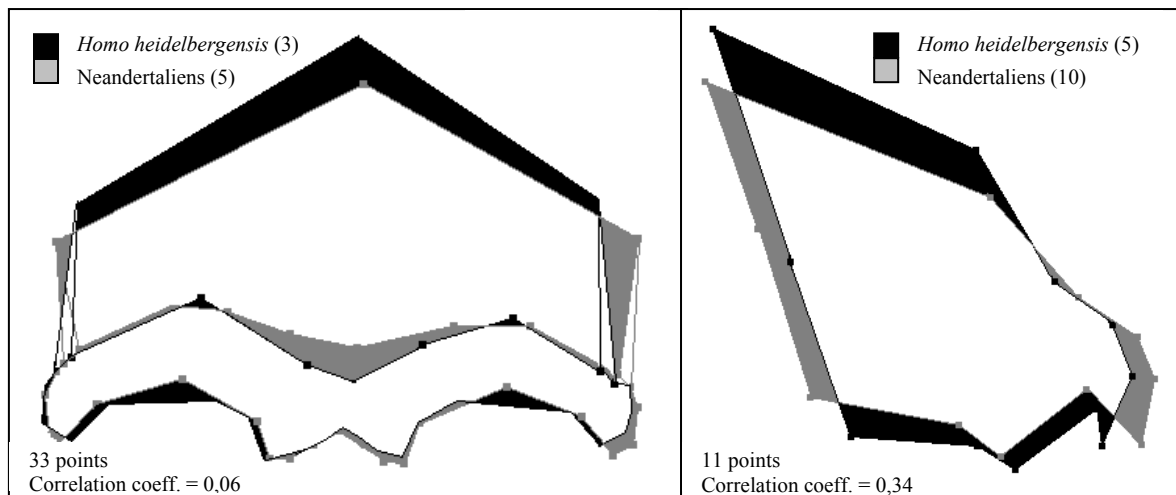


Figure 2 : Superposition interspécifique des vecteurs dans le plan frontal et sagittal.
Figure 2: Interspecific superposition of the vector fields in the frontal and sagittal planes.

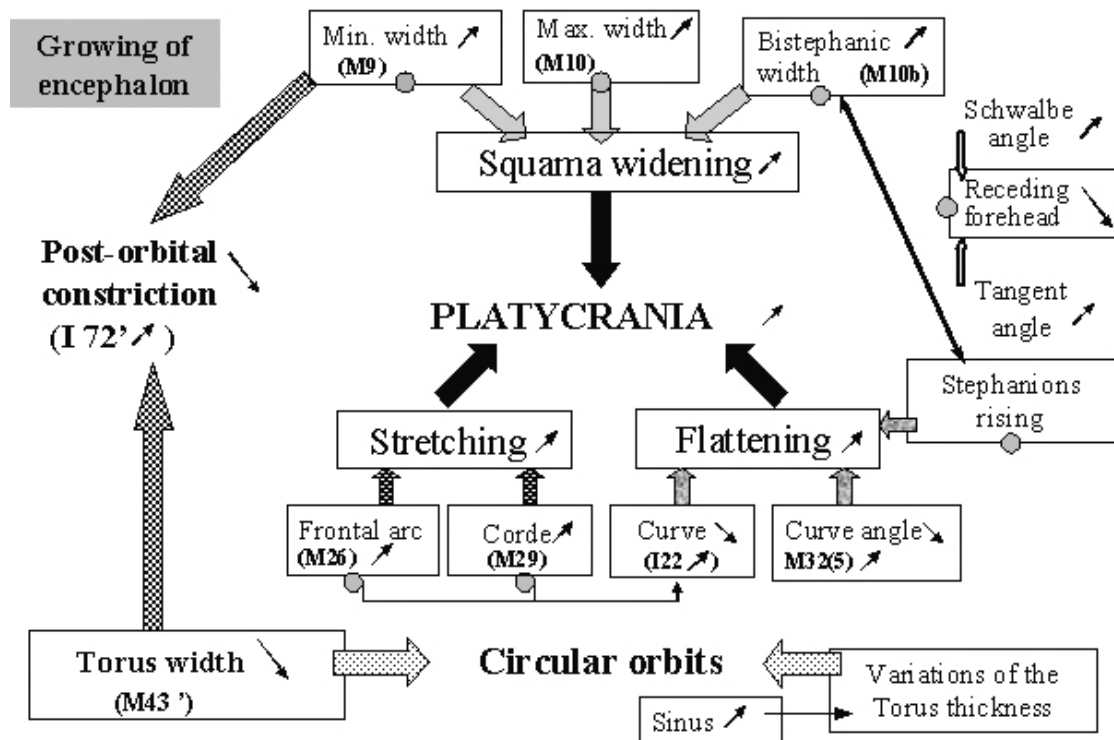


Figure 3: Ensemble des modifications observées sur le frontal durant le passage des *Homo heidelbergensis* aux *Homo neanderthalensis*. Les petites flèches correspondent à l'évolution du caractère (croissance ou réduction) ; les cercles représentent les poussées du cerveau.

Figure 3: Overall modifications observed on the frontal during the passage from the *Homo heidelbergensis* to *Homo neanderthalensis*. The small arrows correspond to the evolution of the character (rise or reduction); the circles represent the push of brain.

